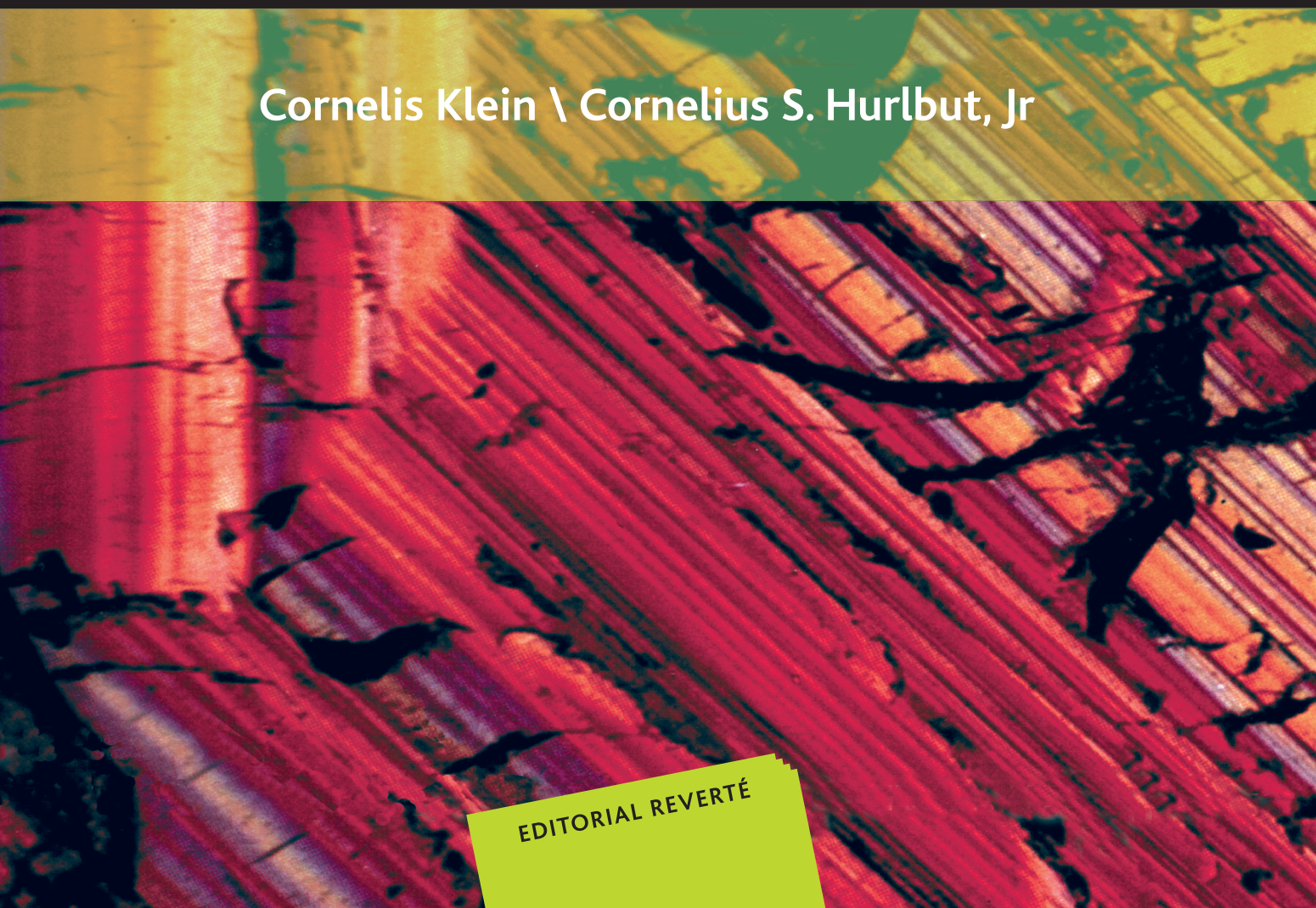
Manual de Mineralogía

Vol. 2

cuarta edición

Basado en la obra de J. D. Dana

Cornelis Klein \ Cornelius S. Hurlbut, Jr



EDITORIAL REVERTÉ

Manual de Mineralogía

Vol. 2

cuarta edición

Basado en la obra de J. D. Dana

Cornelis Klein
The University of New Mexico

Cornelius S. Hurlbut, Jr
Harvard University

EDITORIAL
REVERTÉ

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · Caracas · México

Título de la obra original:
Manual of Mineralogy, 21st Edition

Edición original en lengua inglesa publicada por
John Wiley & Sons, Inc., New York, USA

Copyright © by John Wiley & Sons, Inc.

Edición en papel
© Editorial Reverté, S. A., 1997
ISBN: 978-84-291-4606-6 Tomo I
ISBN: 978-84-291-4607-3 Tomo II
ISBN: 978-84-291-4608-0 Obra completa

Edición e-book (PDF)
© Editorial Reverté, S. A., 2018
ISBN: 978-84-291-9455-5 Tomo I
ISBN: 978-84-291-9456-2 Tomo II

Versión española por
Dr. J. Aguilar Peris
Catedrático de Termología de la Universidad Complutense de Madrid

Propiedad de:
EDITORIAL REVERTÉ, S. A.
Loreto, 13-15. Local B
08029 Barcelona. ESPAÑA
Tel: (34) 93 419 33 36
reverte@reverte.com
www.reverte.com

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, queda rigurosamente prohibida, salvo excepción prevista en la ley. Asimismo queda prohibida la distribución de ejemplares mediante alquiler o préstamo públicos, la comunicación pública y la transformación de cualquier parte de esta publicación (incluido el diseño de la cubierta) sin la previa autorización de los titulares de la propiedad intelectual y de la Editorial. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal). El Centro Español de Derechos Reprográficos (CEDRO) vela por el respeto a los citados derechos.

1179

PREFACIO

La mineralogía es una parte fundamental de la educación de los alumnos de geología y puede también formar parte de un currículum en ciencia de los materiales. Para ello se requiere el desarrollo de uno o más cursos de mineralogía. Estos cursos se consideran requisitos previos para cursar otros de nivel superior en petrología, geoquímica, geología económica o en la propia mineralogía. El primer curso de esta ciencia debe tratar tanto los conceptos básicos como los aspectos descriptivos de los minerales más comunes. Generalmente los conceptos y principios básicos se imparten en las clases teóricas, mientras que los aspectos descriptivos y el estudio de las muestras de minerales y rocas se tratan generalmente en el laboratorio. Debido a esta dualidad (conceptos frente a materiales descriptivos), los profesores suelen tener una preferencia personal a la hora de poner el énfasis en uno u otro aspecto. Por ello, algunos textos destacan especialmente el orden interno de los cristales, sus propiedades químicas y los aspectos estructurales de los cristales, así como la evaluación cuantitativa de las propiedades físicas, tales como el color, el magnetismo, la dureza, la densidad y los parámetros ópticos. En cambio, otros textos pueden conducir a los estudiantes hacia un trabajo exhaustivo de laboratorio, relacionado con los aspectos más descriptivos y determinativos de la mineralogía. Este último enfoque prepara mejor al estudiante para la petrología de muestreo a costa de una menor preparación en los aspectos más conceptuales de la ciencia.

En esta nueva edición (cuarta versión española, correspondiente a la 21ª edición americana del *Manual de Mineralogía*) intentaremos de nuevo conseguir un equilibrio entre conceptos y principios por una parte, y entre el tratamiento descriptivo y sistemático de la mineralogía por otra. Este objetivo equilibrado requiere el tratamiento de muchos temas. No todos ellos pueden tratarse en un curso de un año y mucho menos en un curso semestral o trimestral. En esta edición, los capítulos 2 a 9 se refieren a conceptos, principios y técnicas. Los capítulos 10 a 13 tratan de la mineralogía sistemática y descriptiva. El capítulo 14 es una introducción a la petrología y el Capítulo 15 ofrece una introducción a las gemas más comunes.

Esta edición incorpora importantes revisiones y adiciones al tratamiento ofrecido en la edición anterior. Así se incorpora un capítulo casi totalmente nuevo sobre "Química de cristales" (Capítulo 4) y una importante revisión de "Química de minerales" (incorporada al Capítulo 5); incluye un nuevo capítulo sobre "Diagramas de estabilidad de los minerales" (Capítulo 9) a fin de preparar al estudiante para el uso extensivo de estos diagrama en los capítulos subsiguientes (capítulos 10 a 14) sobre "Mineralogía sistemática" y "Conjuntos minerales"; presenta un tratamiento más lógico de "Morfología" (Capítulo 2) que en la edición anterior a costa de un menor énfasis sobre la simetría interna en el Capítulo 2; en el Capítulo 3 "Orden y simetría interna" se incorpora una nueva secuencia lógica y bien ilustrada del orden y la simetría en una, dos y tres dimensiones; por último, en los capítulos que tratan la "Mineralogía sistemática" (Capítulos 10 a 13) se eliminan las referencias sobre información poco usada (por ejemplo, ángulos interfaciales, relaciones axiales, y datos químicos obtenidos por soplete) y se incluye información actualizada sobre yacimientos minerales importantes. A lo largo de esta nueva edición se han incluido abundantes nuevas ilustraciones para una mejor comprensión de los conceptos abordados en el texto.

El principal tema unificador de este texto, al igual que en las ediciones anteriores, es el de "Química de cristales", es decir, el estudio y aclaración de las relaciones entre composición química, estructura interna y propiedades físicas de la

materia cristalina. La materia expuesta en los ocho primeros capítulos ha sido dispuesta de modo que el profesor pueda elegir aquellos capítulos que considere más esenciales. Resultará imposible en la mayor parte de los cursos cubrir la materia expuesta en estos capítulos. Por ejemplo, los capítulos 7 y 8 sobre mineralogía de rayos X y mineralogía óptica respectivamente, no juegan por regla general un papel importante en un curso de introducción la mineralogía. Sin embargo, se incluyen estos temas porque en el tratamiento subsiguiente sobre "mineralogía sistemática", la descripción de cada especie mineral incluye un listado de diagnosis por rayos X y propiedades ópticas. De igual modo, el Capítulo 15, sobre gemas, puede no ser esencial en un curso específico. Sin embargo, si el estudiante desea conocer cuáles son las técnicas de rayos X y ópticas utilizadas para la determinación de los distintos parámetros y qué cualidades únicas distinguen las piedras preciosas de los minerales ordinarios, la exposición pertinente puede localizarse en los capítulos apropiados.

El Capítulo 1 proporciona una breve introducción a la historia de la mineralogía, a las fuentes de su literatura y a algunos de los desarrollos recientes sobre la instrumentación que permite la evaluación química estructural de los materiales cristalinos a escala muy pequeña. Incluye también una relación de aquellos científicos que han realizado contribuciones reconocidas internacionalmente en los campos de la mineralogía, petrología y geoquímica en las últimas cinco décadas.

En el Capítulo 2 trata de la forma externa y de la simetría de los cristales, mientras que el orden interno se trata en el Capítulo 3. La exposición dentro del capítulo se verifica de modo que el estudio de la forma externa y la deducción de la simetría correspondiente pueda cubrirse sin referencia a la proyección estereográfica, si el profesor así lo desea. Esta proyección se introduce en la página 60, después de la cual cada uno de los sistemas cristalinos (y clases de cristales) se trata sistemáticamente con estereogramas. Al igual que en la edición anterior (20ª edición americana), el tratamiento sistemático de la morfología cristalina comienza con el cristal de más baja simetría y termina con el sistema de simetría máxima. Sin embargo, dentro de cada sistema cristalino, las clases de cristales se disponen en orden de simetría decreciente. Aunque esto parece ilógico respecto a la simetría creciente de los sistemas cristalinos, esta secuencia de clases de cristales es menos complicada, porque las clases de menor simetría pueden describirse como casos especiales de la clase de máxima simetría. Además, si se carece del tiempo suficiente para el desarrollo de todas las clases de cristales, pueden tratarse al menos aquéllas de máxima simetría.

El Capítulo 3 trata del orden en diagramas ordenados de una, dos y tres dimensiones y proporciona una introducción a los grupos espaciales. La secuencia lógica de discusión de los aspectos de simetría y traslación de diagramas de una, dos y tres dimensiones ha sido muy revisada y mejorada en esta edición. Esperamos que esto permita al estudiante alcanzar una mejor comprensión de los componentes de simetría única y traslación de filas, de distribuciones planarias (redes planarias y grupos puntuales) distribuciones ordenadas de tres dimensiones (incluyendo el desarrollo de las redes de Bravais y su relación con los grupos espaciales). El último objetivo de este capítulo es familiarizar al estudiante con las interrelaciones que existen entre la morfología externa, la estructura interna y la notación del grupo espacial. Tal conexión está elaborada con considerable detalle para tres minerales comunes. La exposición del orden ideal en tres dimensiones se continúa con una exposición muy amplia del isoestructuralismo, polimorfismo, politipismo, el estado metamíctico y las complejidades y defectos estructurales. El análisis de la morfología (Capítulo 2) precede al tratamiento del orden interno (Capítulo 3). Hemos tomado esta decisión porque muchos estudiantes encuentran más fácil localizar la simetría en objetos físicos (por ejemplo, modelos cristalinos) que en diseños más abstractos (tales como diagramas de motivos). Sin embargo, esta secuencia no es necesaria en un curso específico, ya que ninguno de los dos capítulos es requisito previo para el estudio del otro.

El Capítulo 4, sobre "Cristaloquímica", ofrece un tratamiento completamente revisado y mucho más amplio del tema. Para aquellos estudiantes con un buen conocimiento previo en química, este capítulo ofrece una buena revisión sobre el tema, los estudiantes con menor formación química encontrarán una introducción eficiente y de fácil comprensión. El texto avanza desde una exposición sobre el átomo, el sistema periódico, el modelo atómico de Bohr, el modelo de Schrödinger a través de la notación cuántica y la configuración electrónica, sigue con los conceptos de ion, radios iónicos y atómicos, coordinación, relaciones radiales, mecanismos de enlace químico y termina con una introducción a los tipos estructurales, cambios del tipos estructural en función de la profundidad creciente en la Tierra y aspectos de la radiatividad.

El Capítulo 5, sobre "Química mineral", ofrece una supervisión introductoria de las técnicas de análisis químico más usadas, tales como análisis químico húmedo, espectroscopía de absorción atómica, fluorescencia de rayos X, técni-

cas de microsonda electrónica y análisis espectográfico óptico. A continuación se expone una discusión detallada de la variación en composición de minerales, como resultado de diversos mecanismos de soluciones sólidas. Otro concepto importante es el de exsolución o desmezcla previo a una discusión extensa con ejemplos de nuevos cálculos de análisis minerales y diversos esquemas de representaciones gráficas de datos químicos.

El Capítulo 6 sobre "Propiedades físicas de los minerales" trata de propiedades como la exfoliación, dureza, densidad, color y magnetismo. En este capítulo se han renovado completamente las secciones de color y magnetismo a base de los conceptos químicos cristalinos desarrollados en el Capítulo 4.

Los Capítulos 7 y 8 tratan específicamente de la cristalografía de rayos X y de las propiedades ópticas de los cristales, son muy semejantes a los de la edición anterior.

El Capítulo 9, "Diagramas de estabilidad de los minerales" es totalmente nuevo y suministra una introducción a los diagramas de estabilidad comúnmente utilizados para ilustrar los equilibrios de los minerales. Comienza con una breve introducción a algunos aspectos básicos de la termodinámica, pero su parte principal está dedicada a una comprensión básica de diagramas de uno, dos y tres (o más) componentes, diagramas para reacciones minerales que implican H_2O ó CO_2 y representaciones Eh-pH. Está ilustrado abundantemente con ejemplos de relaciones de estabilidad de minerales que comúnmente forman parte de la composición de las rocas, la mayoría de los cuales se muestran de nuevo en capítulos subsiguientes (del 10 al 13) que tratan de "Mineralogía sistemática". Este nuevo Capítulo 9 está diseñado específicamente para suministrar al estudiante un conocimiento básico de la estabilidad de los minerales *antes* de la exposición sobre minerales específicos y los aspectos interpretativos de su ocurrencia.

Los Capítulos 10 a 13 tratan de las descripciones sistemáticas de unos 200 minerales, así como de sus asociaciones petrológicas y las localizaciones geográficas de las más importantes localidades minerales. La descripción de cada grupo mineral o serie principal de minerales vienen precedida por una sinopsis de las características más notables de su química y estructura. Cada una de las aproximadamente 200 descripciones contiene una sección sobre "Composición y estructura". Las estructuras minerales vienes ilustradas con las mejores representaciones disponibles poliédricas y geométricas. A estos cuatro capítulos se han añadido aproximadamente 40 nuevas ilustraciones (incluyendo representaciones de estructuras, fotografías del microscopio electrónico de alta resolución, reproducciones de especies minerales y dibujos de línea). Cada una de las descripciones minerales se ha diseñado eliminando los datos de los ángulos interfaciales, relaciones axiales y análisis de soplete.

El Capítulo 14, sobre "Conjuntos minerales", presenta una breve introducción a la petrología y su relación con la mineralogía. La exposición incluye esquemas actualizados de clasificación de tipos de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. También se incluyen representaciones gráficas de conjuntos de rocas metamórficas.

El Capítulo 15 proporciona una breve supervisión de las gemas más corrientes y las técnicas usadas en gemología. Contienen cuatro láminas en color de gemas y minerales de gemas. Este tema ha sido incluido en el texto –normalmente no se incluye en los textos mineralogía– por la siguiente razón: Los estudiantes de mineralogía terminan sus estudios de esta ciencia y generalmente no saben más sobre las gemas que un profano en este tema. Esto es desafortunado, pero también innecesario. Muy pocos cursos de mineralogía, si es que los hay, incluirán una importante exposición sobre gemas y mucho menos tendrán un laboratorio sobre esta especialidad. Sin embargo, el estudiante encontrará en este capítulo el tratamiento necesario (sin referencia a ningún curso) para convertirse en un cliente bien informado de cualquier establecimiento o joyería de piedras preciosas.

Al final de cada capítulo se ofrecen referencias seleccionadas que pueden orientar al estudiante dentro la literatura más relevante sobre el tema. Las tablas determinativas (Apéndice) y el Índice de minerales, todo ello actualizado, son especialmente útiles para el estudio en el laboratorio y para la identificación de minerales desconocidos.

Resumiendo, al escribir esta edición del *Manual de Mineralogía* nuestro objetivo era el de crear un libro de introducción a la mineralogía que cumpliera dos propósitos: (1) proporcionar al estudiante un conocimiento actualizado de los conceptos y principios básicos de cristalografía, química de cristales, química general, aspectos físicos de los minerales y conceptos de petrología introductorios, esenciales para comprender la génesis de los minerales y rocas; y (2) suministrar una referencia para la identificación rápida y certera de los minerales comunes en el campo y en el laboratorio. Este libro ha sido diseñado para ambos objetivos: un curso de iniciación mineralogía y una referencia mineralógica permanente. Así se ha intentado, con vistas a los alumnos que realizarán posteriores trabajos en mineralogía, así como a aquéllos que seguirán un solo curso sobre este tema.

RECONOCIMIENTOS

Expresamos nuestro sincero agradecimiento a diversos colegas que nos proporcionaron (1) revisiones de la edición 20 del Manual de Mineralogía y/o (2) revisiones de los primeros seis capítulos de la presente edición:

Marc J. Defant, University of South Florida,
Malcolm D. Hill, Northeastern University,
David M. Jenkins, State University of New York at Binghamton,
Bruce M. Loeffler, Colorado College, y
Paul H. Ribbe, Virginia Polytechnic Institute and State University.

También agradecemos a los siguientes colegas que revisaron secciones específicas de este texto:

Andrew R. Campbell, New Mexico Institute of Mining and Technology,
Carl A. Francis, Harvard University,
John Husler, University of New Mexico,
Gregory J. McCarthy, North Dakota State University,
Henry O. A. Meyer, Perdue University,
William C. Metropolis, Harvard University,
Malcolm Ross, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, y
Crayton J. Yapp, University of New Mexico.

Muchas de las nuevas fotografías de estructuras obtenidas con el microscopio electrónico de transmisión de alta resolución (HRTEM) y de muestras minerales para esta edición fueron generosamente proporcionadas por

Jillian F. Banfield, University of Wisconsin,
Peter R. Buseck, Arizona State University,
Rodney C. Ewing, University of New Mexico,
Carl A. Francis, Harvard University,
Ermanno Galli, Instituto di Mineralogia e petrologia, Modena, Italia,
Eugene A. Smelick, Princeton University,
David R. Veblen, Johns Hopkins University, y
LuMin Wang, University of New Mexico.

El procesado por ordenador de la mayor parte de las revisiones de esta edición fue en su mayor parte realizado con eficacia y entrega por Mabel T. Chavez de Santo Domingo Pueblo.

C. K. agradece especialmente a su mujer, Angela, por su continuo apoyo.

Cornelis Klein
Cornelius S. Hurlburt, Jr.

ÍNDICE ABREVIADO

TOMO I

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO 2 CRISTALOGRAFÍA 17

CAPÍTULO 3 CRISTALOGRAFÍA: ORDEN INTERNO Y SIMETRÍA 117

CAPÍTULO 4 CRISTALOQUÍMICA 185

CAPÍTULO 5 QUÍMICA MINERAL 241

CAPÍTULO 6 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MINERALES 275

CAPÍTULO 7 CRISTALOGRAFÍA DE RAYOS X 303

CAPÍTULO 8 PROPIEDADES ÓPTICAS DE LOS MINERALES 319

CAPÍTULO 9 DIAGRAMAS DE ESTABILIDAD MINERAL 341

TOMO II

CAPÍTULO 10 MINERALOGÍA SISTEMÁTICA. Parte I: elementos nativos, sulfuros y sulfosales 369

CAPÍTULO 11 MINERALOGÍA SISTEMÁTICA. Parte II: óxidos, hidróxidos y haluros 411

CAPÍTULO 12 MINERALOGÍA SISTEMÁTICA. Parte III: carbonatos, nitratos, boratos, sulfatos, cromatos, volframatos o tungstatos, molibdatos, fosfatos, arseniatos y vanadatos 447

CAPÍTULO 13 MINERALOGÍA SISTEMÁTICA. Parte IV: silicatos 489

CAPÍTULO 14 ASOCIACIONES DE MINERALES: INTRODUCCIÓN A LA PETROLOGÍA Y MINERALES FILONIANOS 619

CAPÍTULO 15 MINERALES GEMA 657

APÉNDICE TABLAS DETERMINATIVAS A-1

ÍNDICE DE MINERALES IM-1

ÍNDICE ALFAFÉTICO I-1

ÍNDICE ANALÍTICO

CAPÍTULO 10 Mineralogía sistemática

Parte I: elementos nativos, sulfuros y sulfosales

10.1 Clasificación mineral 370

10.2 Elementos nativos 371

10.2.1 Metales nativos 371
10.2.2 Semimetales nativos 378
10.2.3 No-metales nativos 378

10.3 Sulfuros 388

10.4 Sulfosales 409

Referencias y lecturas sugeridas 410

CAPÍTULO 11 Mineralogía sistemática

Parte II: óxidos, hidróxidos y haluros

11.1 Óxidos 412

11.1.1 Grupo de las hematites X_2O_3 418
11.1.2 Grupo del rutilo, XO_2 422
11.1.3 Grupo de las espinelas, XY_2O_4 426

11.2 Hidróxidos 434

11.3 Haluros 441

Referencias y lecturas sugeridas 446

CAPÍTULO 12 Mineralogía sistemática

Parte III: carbonatos, nitratos, boratos, sulfatos, cromatos, volframatos o tungstatos, molibdatos, fosfatos, arseniatos y vanadatos

12.1 Carbonatos 448

12.1.1 Grupo de la calcita 448
12.1.2 Grupo del aragonito 456
12.1.3 Grupo de la dolomita 461

12.2 Nitratos 464

12.3 Boratos 465

12.4 Sulfatos y cromatos 469

12.4.1 Grupo de la baritina 471

12.5 Volframatos (o tungstatos) y molibdatos 477

12.6 Fosfatos, arseniatos y vanadatos 480

12.6.1 Grupo del apatito 482

Referencias y lecturas sugeridas 488

CAPÍTULO 13 Mineralogía sistemática

Parte IV: silicatos

13.1 Nesosilicatos 495

13.1.1 Grupo de la fenaquita 498
13.1.2 Grupo del olivino 498
13.1.3 Grupo del granate 501
13.1.4 Grupo Al_2SiO_5 506
13.1.5 Grupo de la humita 510

13.2 Sorosilicatos 514

13.2.1 Grupo de la epidota 516

13.3 Ciclosilicatos 520

13.4 Inosilicatos 527

13.4.1 Grupo de los piroxenos 527
13.4.2 Grupo de los piroxenoides 537
13.4.3 Grupo de los anfíboles 541

13.5 Filosilicatos 554

13.5.1 Grupo de las serpentinas 562
13.5.2 Grupo de minerales arcillosos 568
13.5.3 Grupo de las micas 571
13.5.4 Grupo de las cloritas 577

13.6 Tectosilicatos 581
13.6.1 Grupo SiO_2 582
13.6.2 Grupo de los feldespatos 589
13.6.3 Grupo de los feldespatoides 602
13.6.4 Serie de las escapolitas 607
13.6.5 Grupo de las zeolitas 609
Referencias y lecturas sugeridas 617

CAPÍTULO 14 Asociaciones de minerales: introducción a la petrología y minerales filonianos

14.1 Rocas ígneas 620
14.1.1 Yacimientos generales y textura 621
14.1.2 Composición química 622
14.1.3 Clasificación 622
14.1.4 Composición mineralógica 626
14.1.5 Rocas plutónicas 626
14.1.6 Rocas volcánicas 629
14.2 Rocas sedimentarias 632
14.2.1 Composición química 633
14.2.2 Composición mineralógica 633
14.2.3 Clasificación 634
14.3 Rocas metamórficas 644
14.3.1 Composición química 645
14.3.2 Composición mineralógica 646
14.4 Filones y minerales filonianos 654
Referencias y lecturas sugeridas 656

CAPÍTULO 15 Minerales gema

15.1 Minerales gema 658
15.2 Propiedades de las gemas 658
15.3 Tipos de tallas en las gemas 659
15.4 Usos primitivos de las gemas 660
15.5 Gemas importantes: ayer y hoy 661
15.5.1 Diamante 661
15.5.2 Berilo 661
15.5.3 Rubí y zafiro 662
15.5.4 Ópalo 663
15.5.5 Jade 663
15.5.6 Crisoberilo 664
15.5.7 Topacio 664
15.5.8 Turmalina 664
15.5.9 Cuarzo 665
15.5.10 Turquesa 665
15.5.11 Granate 665
15.5.12 Circón (o zircón) 665
15.5.13 Olivino 666
15.6 Propiedades de las gemas e instrumentos para su determinación 666
15.6.1 Observación 666
15.6.2 Lupa de mano 666
15.6.3 Microscopio 666
15.6.4 Polariscopio 667
15.6.5 Índice de refracción y refractómetro 667
15.6.6 Dispersión 668
15.6.7 Índices de refracción de gemas anisótropas 669
15.6.8 Pleocroísmo 670
15.6.9 Fluorescencia 670
15.6.10 Filtros de color 670
15.6.11 Espectroscopio 671
15.6.12 Propiedades físicas 671
15.6.13 Difracción de rayos X 672
15.7 Gemas sintéticas 673
15.7.1 Proceso Verneuil 673
15.7.2 Proceso de Czochralski 673
15.7.3 Crecimiento por fundente 673
15.7.4 Crecimiento hidrotermal 673
15.8 Tratamiento de gemas 674
15.8.1 Teñido 674
15.8.2 Tratamiento térmico 674
15.8.3 Irradiación 674
15.9 Gemas sintéticas y tratadas 674
15.9.1 Berilo 674
15.9.2 Crisoberilo 675
15.9.3 Corindón (rubí y zafiro) 675
15.9.4 Diamante 675
15.9.5 Jade 676
15.9.6 Ópalo 677
15.9.7 Cuarzo 677
15.9.8 Rutilo 677
15.9.9 Espinela 677
15.9.10 Turquesa 678
15.10 Gemas manufacturadas sin contrapartida natural 678
15.10.1 Granate 678
15.10.2 Titanato de estroncio, $SrTiO_3$ 678
15.10.3 Circonita cúbica (Zirconita o zirconia) 678
Referencias y lecturas sugeridas 679

APÉNDICE TABLAS DETERMINATIVAS A-1

Tabla A.1 Brillo: metálico o submetálico A-3
Tabla A.2 Minerales ordenados según su peso específico A-35
Tabla A.3 Minerales no opacos y algunos compuestos sintéticos ordenados según el índice de refracción creciente A-37

ÍNDICE DE MINERALES IM-1

ÍNDICE ALFAFÉTICO I-1

Capítulo 10 Mineralogía sistemática

Parte I: elementos nativos, sulfuros y sulfosales

10.1 CLASIFICACIÓN MINERAL 370
10.2 ELEMENTOS NATIVOS 371
10.2.1 METALES NATIVOS 371
10.2.2 SEMIMETALES NATIVOS 378
10.2.3 NO-METALES NATIVOS 378
10.3 SULFUROS 388
10.4 SULFOSALES 409
REFERENCIAS Y LECTURAS SUGERIDAS 410

Este capítulo y los tres siguientes incluyen las descripciones de todos los minerales comunes y de aquéllos más raros que poseen una importancia económica grande. La lista, que alcanza un número aproximado de 200, es relativamente pequeña, si se compra con los 3500 que han sido descritos y reconocidos por los mineralogistas como especies válidas. Se cita también el nombre de algunos minerales que no se describen, así como su composición química. Las descripciones de los siguientes minerales[1] tienen un esquema de presentación común. Los epígrafes usados y los datos de cada uno de ellos se expresan a continuación:

Cristalografía. Bajo este título se dan las siguientes informaciones cristalográficas:

Sistema cristalino y símbolo de la clase cristalina.

Características cristalográficas usualmente observadas por la simple inspección, tales como el hábito, maclas y formas.

Otros datos interesantes son detallados sin subtítulos. Como ejemplo, consideremos los datos siguientes para la cerusita:

Pmcn (grupo espacial) $a = 5{,}15$, $b = 8{,}47$, $c = 6{,}11$ Å (dimensiones de la celda unidad), $Z = 4$ (peso de la celda unidad).

d's: 3,59(10), 3,50(4), 3,07(2), 2,49(3), 2,08(3) (líneas de rayos X más destacadas en unidades angström con intensidades relativas, entre paréntesis).

Propiedades físicas. *Exfoliación*, **H** (dureza), **G** (densidad), *Brillo*, *Color*, y propiedades *Ópticas* (breve sumario de datos ópticos).

Composición y estructura. Composición química, usualmente con los porcentajes de los elementos u óxidos y los elementos que pueden sustituir a aquéllos que son dados en la fórmula química. Breve descripción de los aspectos más importantes de la estructura cristalina.

Diagnóstico. Las propiedades sobresalientes y los ensayos que ayudan a reconocer el mineral y distinguirlo de otros.

Yacimiento. Una breve información del modo como se presenta el mineral y características de su asociación con otros.[2] Localidades en donde se encuentran o han encontrado yacimientos notables por su cantidad o calidad. De aquellos minerales que se encuentran en abundancia en todo el mundo, se citan principalmente lugares de EE.UU. y España.

Empleo. En los minerales de importancia económica, se da una breve descripción de sus aplicaciones.

Especies similares. La similitud de otros minerales con aquél cuya descripción se ha dado puede basarse tanto en su composición química como en su estructura cristalina.

10.1 CLASIFICACIÓN MINERAL

La composición química ha sido la base de la clasificación de los minerales desde la mitad del siglo diecinueve. De acuerdo con este esquema los minerales se dividen en clases, según el anión o grupo aniónico dominante (por ej., óxidos, haluros, sulfuros, silicatos, etc.). Existen una serie de razones que justifican este criterio para la clasificación de los minerales. En primer lugar, los minerales que poseen el mismo anión o grupo aniónico dominante en su composición poseen semejanzas familiares inconfundibles, más clara y fuertemente marcadas que aquéllas que comparten los minerales que poseen el mismo catión dominante. Así, los carbonatos se parecen entre sí más que los minerales de cobre. En segundo lugar, los minerales relacionados por el dominio del mismo anión tienden a presentarse juntos en el mismo lugar o en yacimientos geológicos semejantes. Así, los sulfuros se presentan en asociación mutua próxima en depósitos del tipo de vetas o reemplazamiento, mientras que los silicatos forman la mayor parte de las rocas de la corteza terrestre. En tercer lugar, este esquema de clasificación de los minerales está en concordancia con la práctica química corriente de nomenclatura y clasificación de los compuestos inorgánicos.

Sin embargo, pronto se reconoció que la química sola no basta para caracterizar adecuadamente un mineral. Una apreciación completa de la naturaleza de los minerales exige el uso de los rayos X para la determinación de las estructuras internas. La clasificación mineral debe basarse en la composición química *y* en la estructura interna, pues ambas conjuntamente representan la esencia de un mineral y determinan sus propiedades físicas. Los principios cristaloquímicos fueron utilizados por vez primera por W. L. Bragg y V. M. Goldschmidt para los minerales silicatos. Este gran grupo de minerales se dividió parcialmente en subclases sobre la base de la composición química y principalmente en función de la estructura interna. Dentro de la clase silicatos, por tanto, existen silicatos a láminas y en cadenas que son subclases basadas en la disposición estructural de los tetraedros de SiO_4. Estos principios estructurales, en combinación con la composición química, proporcionan una clasificación lógica. Este esquema de clasificación es el utilizado en las siguientes secciones sobre mineralogía sistemática.

[1] Los nombres de minerales se dan en letras negritas mayúsculas (por ej., **ORO**) o minúsculas (por ej., **Acantita**). Los primeros se consideran más comunes o importantes.

[2] Véase Cap. 14 para un estudio de los tipos de rocas, asociación de minerales y algunos términos relacionados con las menas.

Las divisiones más amplias de la clasificación usadas en este libro (basadas en las obras de C. Palache, H. Berman y C. Frondel, *Dana's System of Mineralogy*, 7ª ed. y H. Strunz, *Mineralogische Tabellen*, 5ª ed., véase Referencias) son:

1.	Elementos nativos	Capítulo 10
2.	Sulfuros	
3.	Sulfosales	
4.	Óxidos	Capítulo 11
	(a) Simples y múltiples	
	(b) Hidróxidos	
5.	Haluros	
6.	Carbonatos	Capítulo 12
7.	Nitratos	
8.	Boratos	
9.	Fosfatos	
10.	Sulfatos	
11.	Volframatos	
12.	Silicatos	Capítulo 13

Estas se subdividen en *familias*, basándose en los tipos químicos, y la familia, a su vez, se divide en *grupos*, que presentan una gran similitud cristalográfica y estructural. El grupo está formado por *especies*, que pueden formar *series* entre sí. Las especies tienen la misma estructura pero diferente composición química. Una *especie* puede subdividirse en *variedades* químicas mediante adjetivos modificadores que reflejan la presencia de cantidades no usuales de constituyente químicos. Ejemplos de estos adjetivos son:

alumínico:	rico en Al
cálcico:	rico en Ca
crómico:	rico en Cr
ferroso:	rico en Fe^{2+}
férrico:	rico en Fe^{3+}
magnesiano:	rico en Mg
manganésico:	rico en Mn, etc.

Algunos ejemplos son: egirina manganésica, diópsido férrico, o augita magnesiana.

En cada una de las clases, se da primero el mineral que posee la relación más alta de metal a no metal, seguido por aquellos minerales que contienen progresivamente menos metal. Como en este libro se describe un número relativamente pequeño de minerales, con frecuencia sólo se representa un miembro de un grupo o familia y por tanto resulta impracticable una rigurosa división y subdivisión.

Como introducción a cada una de las clases químicas se hacen algunas observaciones preliminares referentes a su cristaloquímica y estructura cristalina.

10.2 ELEMENTOS NATIVOS

Con excepción de los gases libres de la atmósfera, solamente unos veinte elementos se encuentran en estado nativo. Estos elementos pueden dividirse en: 1) metales; 2) semimetales; 3) no metales. Los *metales nativos* más comunes, que presentan estructuras muy sencillas, forman tres grupos: el *grupo del oro* (grupo espacial: *Fm*3*m*), que comprende oro, plata, cobre y plomo, todos ellos isoestructurales; el *grupo del platino* (grupo espacial: *Fm*3*m*), que comprende el platino, paladio, iridio y osmio, todos ellos isoestructurales y el *grupo del hierro* (grupo espacial *Fm*3*m*), que comprende hierro y ferroníquel, de los cuales el hierro puro y la kamacita poseen el grupo espacial *Im*3*m* y la variedad rica en Ni del ferroníquel (taenita) posee el grupo espacial *Fm*3*m*. Se han encontrado también mercurio, tántalo, estaño y zinc. Los *semimetales nativos* forman dos grupos isoestructurales: arsénico, antimonio y bismuto (grupo espacial *R*3*m*), y los menos frecuentes selenio y teluro (grupo espacial $P3_12l$). Los *no metales* importantes: azufre y carbono, en forma de diamante y grafito.

ELEMENTOS NATIVOS

Metales		Semimetales	
Grupo del oro		Grupo del arsénico	
Oro	Au	Arsénico	As
Plata	Ag	Bismuto	Bi
Cobre	Cu	No metales	
Grupo del platino		Azufre	S
Platino	Pt	Diamante	C
Grupo del hierro		Grafito	C
Hierro	Fe		
(Kamacita	Fe, Ni)		
(Taenita	Fe, Ni)		

10.2.1 Metales nativos

Es propio que la *mineralogía sistemática* comience con el estudio del grupo del oro porque los conocimientos que tiene el hombre acerca de las propiedades y utilidad de los metales proceden del descubrimiento casual de pepitas y masas de estos minerales. En muchas de las civilizaciones primitivas relativamente avanzadas el empleo de los metales estuvo limitado al de aquéllos que encontraron en estado nativo.

Los elementos del *grupo del oro* pertenecen a la misma familia en la clasificación periódica de los elementos y, por lo tanto, sus átomos tienen propiedades químicas algo seme-

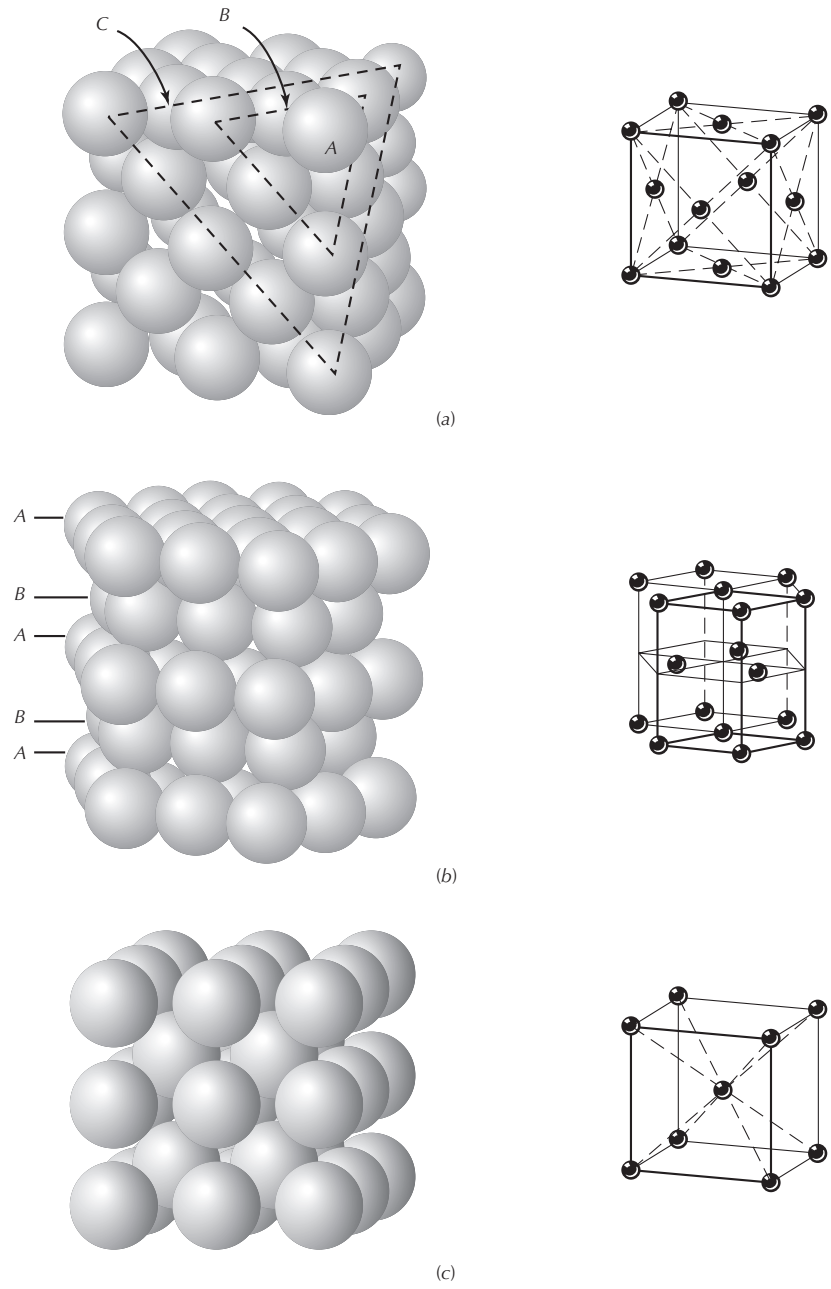
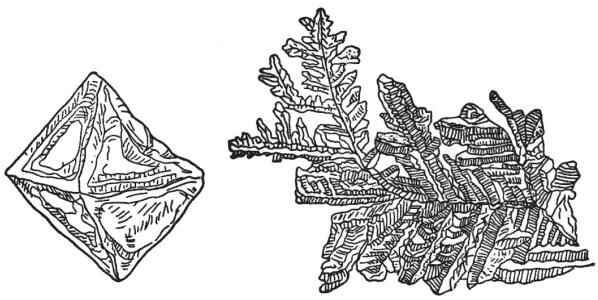


FIGURA 10.1 (*a*) Modelo de empaquetamiento cúbico compacto (*ABCABC*…) de esferas iguales presentado por el Cu, Au, Pt y otros muchos metales. Cada átomo metálico está rodeado por 12 vecinos próximos (Figs. 4.19 y 4.20). Las capas de empaquetamiento compacto son paralelas a {111}. A la derecha se ilustra la red cúbica centrada en las caras (*F*) compatible con esta secuencia de empaquetamiento. (*b*) Empaquetamiento hexagonal compacto (*ABAB*…) de esferas iguales presentado por el Mg, Zn y Cd. Cada átomo metálico está rodeado por 12 vecinos próximos (véanse también figs. 4.19 y 4.20). Este tipo de empaquetamiento conduce a una red hexagonal (*H*), como se ilustra a la derecha, que puede interpretarse como una red romboédrica (*R*) (véase Fig. 3.17; nº 11). (*c*) Empaquetamiento cúbico centrado en el cuerpo de esferas iguales, presentado por el Fe. Cada esfera está rodeada por 8 vecinos próximos. Este empaquetamiento no es tan compacto como el *ECC* y el *EHC*. La red centrada en el cuerpo (*I*) compatible con este modelo de empaquetamiento viene ilustrada a la derecha.

jantes y todos son lo suficientemente inertes como para encontrarse en un estado elemental en la naturaleza. Cuando no están combinados con otros elementos, los átomos de estos metales están formando estructuras cristalinas con un enlace metálico que es bastante débil. Los minerales son isoestructurales, con redes cúbicas centradas en las caras, con átomos idénticos en coordinación 12 (Fig. 10.1*a*). Una solución sólida completa tiene lugar entre el oro y la plata, pues estos dos elementos poseen los mismos radios atómicos (1,44 Å). El cobre, debido a su menor radio atómico (1,28 Å), presenta



(*a*) (*b*)

FIGURA 10.2 (*a*) Octaedro de oro deformado. (*b*) Oro dendrítico.

una solución sólida limitada en oro y en plata. Recíprocamente, el cobre nativo sólo posee trazas de oro y plata en solución sólida.

Las propiedades similares de los miembros de este grupo provienen de su estructura común. Todos son más bien blandos, maleables, dúctiles y sectiles. Todos son buenos conductores del calor y de la electricidad, tienen brillo metálico y fractura astillosa, con puntos de fusión más bien bajos. Estas propiedades son consecuencia de su enlace metálico. Todos son cúbicos hexaquisoctaédricos y tienen densidades muy elevadas. Estas propiedades son consecuencia del empaquetamiento muy apretado, llamado *empaquetamiento cúbico compacto*.

Las propiedades que diferencian a los minerales de este grupo dependen de las propiedades de los átomos de los distintos elementos. Así, el amarillo del oro, el rojo del cobre y el blanco de la plata son propiedades atómicas. Los pesos específicos dependen igualmente de las propiedades atómicas y están en proporción aproximada con los pesos atómicos.

Aunque aquí sólo se tratará el platino, el grupo del platino también incluye los minerales raros paladio, platiniridio e iridosmina. Los dos últimos son, respectivamente, aleaciones de iridio y platino e iridio y osmio, con estructura hexagonal de empaquetamiento compacto, $P6_3/mmc$. Sin embargo, la estructura del platino y del paladio es de empaquetamiento cúbico compacto, similar a los metales del grupo del oro con grupo espacial $Fm3m$. Los metales de platino son más duros y tienen puntos de fusión más elevados que los metales del grupo del oro.

Los miembros del *grupo del hierro* son isométricos e incluyen el hierro puro (Fe), que se presenta raramente en la superficie de la Tierra, y dos especies de ferroníquel (*kamacita* y *taenita*), que son corrientes en los meteoritos. El hierro y el níquel tienen radios atómicos casi idénticos (1,26 Å y 1,25 Å, respectivamente) y por ello el níquel puede /y así lo hace usualmente) sustituir al hierro. El hierro puro y la kamacita, que contienen aproximadamente un 5,5% en peso de Ni, presentan un empaquetamiento cúbico compacto con el grupo espacial $Im3m$. La taenita, con un contenido variable del 27 al 65 por ciento en peso de Ni, posee un empaquetamiento cúbico compacto con el grupo espacial $Fm3m$ (Figs. 10.1*a* y 10.1*c*). Estos dos minerales son característicos de los meteoritos de hierro y se supone que las aleaciones de Fe-Ni de este tipo constituyen una gran parte del núcleo de la Tierra.

ORO —Au

Cristalografía. Isométrico; $4/m\bar{3}2/m$. Los cristales son corrientemente octaédricos (Fig. 10.2*a*), pocas veces presentan caras de dodecaedro, cubo o trapezoedro {113}. Frecuentemente, aparecen en grupos arborescentes con cristales alargados en la dirección del eje de simetría ternaria, o aplastados paralelos a una cara del octaedro. Los cristales se forman irregularmente, pasando por formas filiformes, reticuladas y dendríticas (Fig. 10.2*b*). Raras veces adoptan formas de cristal; normalmente, lo hacen en forma de placas irregulares, escamas o masas.

$Fm3m$; a = 4,079 Å; Z = 4. *d's*: 2,36(10), 2,04(7), 1,443(6), 1,229(8), 0,785(5).

Propiedades físicas. **H** $2\frac{1}{2} - 3$, **G** 19,3 cuando es puro. La presencia de otros metales hace disminuir el peso específico, que puede llegar a bajar hasta 15. *Fractura* irregular. Muy maleable y dúctil. Opaco. *Color*: varias tonalidades de amarillo, dependiendo de su pureza; hácese más pálido al aumentar el porcentaje de plata presente.

Composición y estructura. Entre el oro y la plata existe una serie completa de soluciones sólidas y la mayor parte del oro contiene plata. El oro de California contienen de 10 a 15% de plata y cuando este último elemento está en proporción mayor del 20%, la aleación es llamada *electro*. Pueden hallarse presentes pequeñas cantidades de cobre y hierro, así como trazas de bismuto, plomo, estaño, zinc y metales del grupo del platino. La pureza o *ley* del oro se expresa en partes por 1000; la mayor parte del oro contiene un 10%, aproximadamente, de otros metales y, por lo tanto, su ley es 900. La estructura del oro está basada en el empaquetamiento cúbico compacto de los átomos de Au (Fig. 10.1*a*).

Diagnóstico. El oro se distingue de otros sulfuros amarillos (particularmente la pirita y la calcopirita) y de las pajuelas amarillas de mica alterada, por su sectilidad y gran peso específico.

Yacimiento. El oro tiene una abundancia media de 0,004 ppm en la corteza terrestre y es, por tanto, un elemento raro. Aparece en la naturaleza diseminado en pequeñas cantidades. Se le halla corrientemente en filones que tiene relación genética con rocas ígneas de tipo silícico. La mayor parte del oro aparece como elemento nativo. Para una relación de otros minerales (raros) de oro, véase más adelante "Especies semejantes".

La principal fuente de oro son los llamados filones hidrotermales de cuarzo y oro, donde, junto con la pirita y otros sulfuros, el oro fue depositado por soluciones minerales ascendentes que lo contenían. El oro se recupera también como subproducto de los depósitos de sulfuros explotados esencialmente para la obtención de los metales correspondientes. El oro está simplemente mezclado mecánicamente con los sulfuros, y no en forma de combinación química alguna. En la mayoría de los filones, el oro está tan finamente dividido, y distribuido de forma tan uniforme, que su presencia sólo puede ser detectada por técnicas microscópicas.

Los filones que contienen oro, sometidos a la acción del tiempo y meteorizados, liberan el oro que, o bien queda en el manto del suelo, en arenas eluviales, o bien es arrastrado a los arroyos vecinos para formar placeres. Debido a su gran peso específico, el oro se separa mecánicamente de los materiales más ligeros, de las arenas y gravas del lecho de la corriente y se aloja en las irregularidades o grietas del lecho rocoso. El oro se encuentra entonces en forma de granos redondos o aplastados, las pepitas, que pueden separarse con una batea, que es un proceso de lavado que sólo retiene las partículas más pesadas, de las cuales se selecciona fácilmente el oro. Para operar en gran escala se emplea el lavadero. La arena que contiene oro es lavada en lavaderos mecánicos donde el oro queda detenido por unas mesas vibratorias o separadores, y después es amalgamado con mercurio. La minería hidráulica se emplea para mover grandes cantidades de gravas mediante lavaderos. Muchos placeres se explotan actualmente con dragas, algunas de las cuales son gigantes y pueden extraer el oro de miles de metros cúbicos de grava por día.

De la producción mundial estimada de oro en 1981, 1176,7 toneladas, aproximadamente, la mitad procede de la República de Sudáfrica. Las principales fuentes del oro de Sudáfrica son el conglomerado precámbrico Witwatersrand "el Rand", en Transvaal y otros conglomerados semejante en el Estado libre de Orange. Se supone que los filones de estos conglomerados, en los cuales está concentrado el oro, son placeres fósiles. Hoy se estima que aproximadamente el 20% de la producción de oro del mundo procede de la Comunidad de Estados Independientes (CIS), que es por tanto, el segundo país productor del mundo. Hay yacimientos en los Montes Urales, pero se estima que los 2/3 de la producción procede de placeres de Siberia. En tercer lugar está la China, seguida por el Canadá, los Estados Unidos y el Brasil.

En EE.UU., los estados más importantes en la producción de oro son actualmente: Dakota del Sur, Nevada, Utah, Arizona y Montana. El oro de Arizona y Utah es esencialmente un subproducto de la extracción del cobre. Durante 100 años, después del descubrimiento de oro en los torrentes de California en 1848, este estado fue el primer productor. Los distritos productores de oro más importantes fueron los de Mother Lode, filones de cuarzo aurífero situados a lo largo de la vertiente occidental de Sierra Nevada.

En España no existen yacimientos importantes de oro. Antiguamente se beneficiaron las arenas auríferas del Darro, Miño, Sil y otros ríos españoles.

Empleo. La mayor parte del oro existente pertenece a diversos países en forma de lingotes y se utiliza como garantía de pagos internacionales. Una forma creciente, en forma de medallas y pequeñas barras, se utiliza como forma de inversión. Otros usos son la joyería, instrumentos científicos, electrodeposición, pan de oro y prótesis dentales.

Especies semejantes. Además del oro nativo existen 19 raros (o muy raros) en los cuales el oro se combina con otros elementos. La mayoría son telururos. Los ejemplos más destacados son: *calaverita*, $AuTe_2$, asociado con otros telururos en Cripple Creek, Colorado, y en Kalgoorlie, Australia Occidental; y *silvanita*, $(Au, Ag)Te_2$, también encontrada en las localidades citadas. Otros son: *krennerita,* $(Au, Ag)Te_2$; *petzita*, Ag_3AuTe_2; *kostovita*, $CuAuTe_4$; *montbrayita*, $(Au, Sb)_2Te_3$; y *muthmannita*, (Ag, Au)Te. Otros compuestos son: *uytenbogaardita*, Ag_3AuS_3; *fischesserita*, Ag_3AuSe_2; y *nagyagita*, $Pb_5Au(Te, Sb)_4S_{5\text{-}8}$. Para una relación completa de minerales que contienen oro, véase Wilson (1982).

PLATA —Ag

Cristalografía. Isométrica; $4/m\bar{3}2/m$. Comúnmente se da en cristales mal formados y en grupos ramosos, arborescentes y reticulados. Se la encuentra normalmente en masas irregulares, placas y escamas; a veces granuda o en finos alambres (Fig. 10.3).

*Fm*3*m*; a = 4,09 Å; Z = 4. *d's*: 2,34(10), 1,439(6), 1,228(8), 0,936(7), 0,934(8).

Propiedades físicas. **H** $2\frac{1}{2} - 3$, **G** 10,5, en ejemplares puros, 10-12 en los impuros. *Fractura* astillosa. Maleable y dúctil. *Brillo* metálico. *Color* y *huella* blanco de plata; frecuentemente, con pátina castaño o gris-negro.

FIGURA 10.3 Plata, Kongsberg, Noruega.

Composición y estructura. La plata nativa contiene frecuentemente mercurio, cobre y oro en aleación; en casos menos frecuentes, platino, antimonio y bismuto. La *amalgama* es una solución sólida de plata y mercurio. La estructura de la plata está basada en un empaquetamiento cúbico compacto de átomos Ag (Fig. 10.1*a*).

Diagnóstico. La plata puede distinguirse de otros minerales de aspecto similar por su naturaleza maleable, su color en superficie fresca y su alto peso específico.

Yacimiento. La plata nativa está extensamente distribuida en pequeñas cantidades, principalmente en la zona de oxidación de los depósitos de minerales. Los grandes depósitos de plata natural son probablemente el resultado de una deposición primaria de plata de soluciones hidrotermales. Hay tres tipos de depósitos primarios: (1) Asociada a sulfuros, zoolitas, calcita, barita, fluorita y cuarzo, tipificada en los yacimientos de Konsberg, Noruega. Las minas de esta localidad, explotadas durante centenares de años, han producido magníficas muestras de alambre de plata. (2) Con arseniuros y sulfuros de cobalto, níquel y plata y con bismuto nativo. Ésta es la forma en la que aparece en las antiguas minas de plata de Freiberg y Schneeberg, en Sajonia, y de Cobalt, Ontario. (3) Con uraninita y minerales de cobalto-níquel. De este tipo son las antiguas minas, todavía activas, de Joachimsthal, Bohemia y del Lago del Gran Oso, Territorios del Noroeste, Canadá.

En los Estados Unidos, pequeñas cantidades de plata nativa primaria están asociadas con cobre nativo en la Península de Keweenaw, Michigan. En otras parte la plata nativa aparece generalmente como secundaria. La mayor parte del suministro mundial de plata procede de sulfuros y sulfosales de plata. Los principales productores de plata son Canadá, Perú, Méjico y los Estados Unidos. Méjico es un productor históricamente muy importante.

En España se encuentra en cantidad en Hiendelaencina, Guadalajara, Horcajo, Ciudad Real, y Las Herrerías, Almería.

Empleo. Como mena de plata, aunque la mayor parte de la producción mundial provine de otros minerales, como la *acantita*, Ag_2S, *proustita*, Ag_3AsS_3 y *pirargirita*, Ag_3SbS_3. Los principales usos de la plata son para emulsiones fotográficas, plateado, aleaciones con cobre, cubiertos de mesa y equipos electrónicos. A causa de la disminución de su producción y su precio creciente, las monedas de plata han sido ampliamente sustituidas en todos los países por metales como el níquel y el cobre.

COBRE —Cu

Cristalografía. Isométrico; $4/m\bar{3}2/m$. comúnmente con caras de tetraquishexaedro, también cubo, dodecaedro y octaedro. Los cristales aparecen normalmente mal formados y en ramas o grupos arborescentes (Figs. 10.4*a* y *b*). Generalmente, se da en masas, placas y escamas irregulares, en formas torcidas y en alambre.

*Fm*3*m*; a = 3,615 Å, Z = 4, *d's*: 2,09(10), 1,81(10), 1,28(10), 1,09(10), 1,05(8).

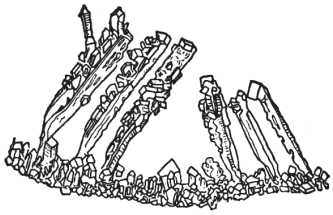
Propiedades físicas. **H** $2\frac{1}{2} - 3$, **G** 8,9. Muy dúctil y maleable. *Fractura* astillosa. *Brillo* metálico. *Color* rojo cobre en su superficie fresca, normalmente oscuro con brillo apagado por su pátina.

Composición y estructura. El cobre nativo contiene generalmente pequeñas cantidades de plata, bismuto, mercurio, arsénico y antimonio. La estructura del cobre está basada en el empaquetamiento cúbico compacto de átomos de Cu (Fig. 10.1*a*).

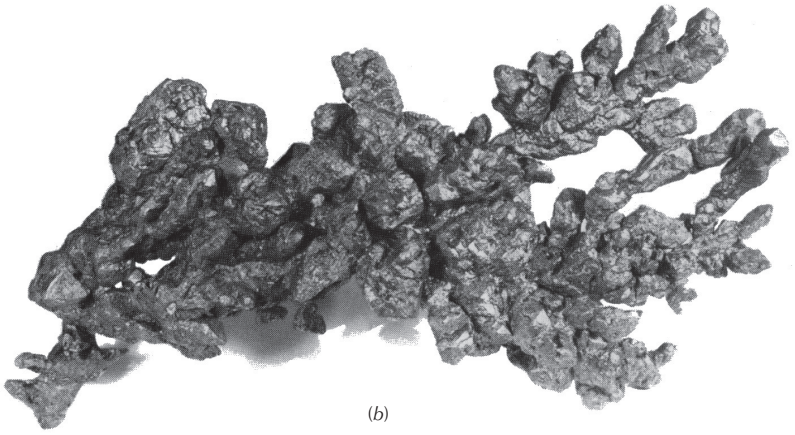
Diagnóstico. El cobre nativo puede reconocerse por su color rojo en superficie reciente, su fractura astillosa, su gran peso específico y su maleabilidad.

Yacimiento. Se encuentran pequeñas cantidades de cobre nativo en muchos lugares, en las zonas oxidadas de los depósitos de cobre, asociado a cuprita, malaquita y azurita.

Los depósitos de cobre nativo más primarios están asociados a lavas basálticas, donde la deposición de cobre es el resultado de soluciones hidrotermales con minerales de óxi-



(*a*)



(*b*)

FIGURA 10.4 (*a*) Cobre dendrítico, Broken Hill, Nueva Gales del Sur, Australia. (*b*) Cobre nativo, Península de Keweenaw, Michigan (Harvard Mineralogical Museum).

do de hierro. Los depósitos de cobre nativo más importantes en el mundo se hallan en la Península de Keweenaw, al noroeste de Michigan, en la orilla sur del lago Superior. Las rocas de la región están compuestas por lavas básicas del Precámbrico interestratificadas con conglomerados. La serie, extendida 160 km a lo largo de la península, se sumerge hacia el noroeste por debajo del lago Superior y emerge en la isla Royal, a 80 km de distancia. Cortando estas rocas se encuentran algunas venas de cobre, pero donde más se presenta es en las lenguas de lava que llenan las cavidades o en los conglomerados que rellenan los intersticios o sustituyen a los guijarros. Está asociado a minerales tales como prehnita, epidota, datolita, calcita y varias zeolitas. Están presentes pequeñas cantidades de plata nativa. El cobre de Michigan fue aprovechado hace tiempo por los indios americanos, pero no fue hasta 1840 que se localizó su origen. Poco después comenzó su explotación y durante los 75 años siguientes hubo una gran actividad minera a lo largo de la Península de Keweenaw. La mayor parte del cobre del distrito aparecía en trozos irregulares muy pequeños, aunque también se encontraron grandes masas; en 1859 se descubrió una que pesaba 520 toneladas.

Yacimientos esporádicos de cobre, similares al del distrito del lago Superior, han sido hallados en las áreas de arenisca de la parte oriental de los Estados Unidos, especialmente en Nueva Jersey, y en la morrena glacial, que cubre una área similar en Connecticut. En Corocoro, al sudoeste de La Paz (Bolivia), existe también un importante yacimiento en arenisca. El cobre nativo, a veces en grupos de finos cristales, aparece asociado en cantidades pequeñas a las menas oxidadas de cobre en Ajo, Bisbeey y Ray, Arizona, y en la Mina del Chino, Santa Rita, Nuevo Méjico.

En España se ha encontrado cobre nativo en Linares, Jaén, y en el distrito minero de Río Tinto, aunque siempre en pequeñas cantidades.

Empleo. Una mena secundaria de cobre. Los sulfuros de cobre son hoy en día la principal mena del metal. Se emplea principalmente para usos eléctricos, especialmente cables. Viene utilizándose extensamente en aleaciones, tales como latón (cobre y zinc), bronce (cobre y estaño con algo de zinc) y lata alemana (cobre, zinc y níquel). Éstos y otros empleos de menor importancia hacen del cobre el metal más esencial en la civilización moderna, después del hierro.

PLATINO — Pt

Cristalografía. Isométrica; $4/m\bar{3}2/m$. Los cristales cúbicos son poco frecuentes y normalmente están deformados. Se encuentra, por lo general, en pequeños granos y escamas; en algunos lugares, en masas irregulares y pepitas de gran tamaño.

$Fm3m$; a = 3,923 Å, Z = 4. *d's*: 2,27(9), 1,180(10), 1,956(8), 1,384(8).

Propiedades físicas. **H** $4 - 4\frac{1}{2}$ (excepcionalmente grande para un metal). **G** 21,45 puro; 14 a 19, nativo. Maleable y dúctil. *Color* gris de acero, con brillo reluciente. Es magnético cuando es rico en hierro.

Composición y estructura. El platino contiene normalmente en aleación diversos porcentajes de hierro y pequeñas cantidades de iridio, osmio, rodio y paladio; también de cobre, oro y níquel. La estructura del platino está basada en un

empaquetamiento cúbico compacto de átomos de Pt (Fig. 10.1*a*).

Diagnóstico. Queda determinado por su alto peso específico, su maleabilidad y su color acerado.

Yacimiento. El platino aparece casi exclusivamente en su estado nativo en rocas ultrabásicas, especialmente dunitas asociadas a olivino, cromita, piroxeno y magnetita. Los depósitos más próximos a las rocas ígneas parentales que contienen platino.

El platino fue descubierto por primera vez en Colombia, América del Sur. Se trajo a Europa en 1735, donde recibió el nombre de *platina*, de la palabra española plata, debido a su parecido con ella. Todavía se producen en colombia pequeñas cantidades de platino procedentes de placeres en dos distritos cerca de la costa del Pacífico. En 1822, el platino fue descubierto también en placeres en el río Tura superior, en la vertiente oriental de los montes Urales, CIS. Desde entonces, la mayor parte de la producción mundial de platino provino de los placeres de este distrito, cuyos centros mineros rodean la ciudad de Nizhne Tagil, pero en 1934, debido a la gran cantidad de platino recuperado de las menas de cobre-níquel de Sudburg, Ontario, Canadá pasó a ser el primer productor. En 1954 la República de Suráfrica pasó a ocupar el primer lugar. Parte de la producción de Sudáfrica es un subproducto de la minería del oro en el Rand, pero la fuente principal es la de Merensky Reef, en las rocas básicas del complejo ígneo de Bushveld. El Merensky Reef es un horizonte de esta capa intrusiva de unos 30 cm de espesor que se extiende a lo largo de muchos kilómetros y que tiene un contenido uniforme de platino de unos 15 g por tonelada de mineral. Los centros principales de explotación están próximos a Rustenburg, en Transvaal. Hoy se estima que aproximadamente el 50% de los metales del grupo del platino del mundo proceden del CIS. En los EE.UU. se producen pequeñas cantidades como un subproducto de la minería de cobre. En el Canadá la mayor parte del platino procede de la *esperrilita*, $PtAs_2$, la cual se encuentra en la mena de cobre-níquel de Sudburg, Ontario.

En España se ha encontrado en las arenas del Darro, Granada, y en formación primaria, en la serranía de Ronda, en dunitas.

Empleo. El empleo del platino depende principalmente de su alto punto de fusión (1755°C), su resistencia a los ataques químicos y gran dureza. Su principal uso es como catalizador para controlar las emisiones de escape de los automóviles y en las industrias química y del petróleo. Es empleado también por los odontólogos, en instrumental médico, joyería y equipamiento eléctricos.

Especies similares. El *iridio*, *iridosmina*, una aleación de iridio y osmio, y el *paladio* son minerales raros del grupo del platino asociados al mismo.

Hierro —Fe

Cristalografía. Isométrico; $4/m\bar{3}2/m$. Cristales raros. *Terrestre*: en nódulos y masas grandes; *meteórico* (*kamacita*): en placas grandes y masas laminares, y en regular intercrecimiento con ferroníquel (*taenita*).

Hierro ordinario (α-Fe y kamacita) cúbico centrado en el cuerpo, $Im3m$, a = 2,86 Å, Z = 2. *d's*: 2,02(9), 1,168(10), 1,430(7), 1,012(7). Ferroníquel (taenita), cúbico centrado en las caras, $Fm3m$, a = 3,56 Å, Z = 4. *d's*: 2,06(10), 1,073(4), 1,78(3),1,27(2).

Propiedades físicas. (α-Fe), exfoliación {010} imperfecta. **H** $4\frac{1}{2}$, **G** 7,3 a 7,9. *Fractura* astillosa. Maleable. Opaco. *Brillo* metálico. *Color* gris acerado a negro. Fuertemente magnético.

Composición y estructura. (α-Fe) siempre con algo de níquel y frecuentemente con pequeñas cantidades de cobalto, cobre, manganeso, azufre y carbono. El mineral *kamacita* contiene aproximadamente el 5,5 por ciento de peso en Ni. La *taenita* varía mucho en su contenido de Ni (del 27 al 65% en peso). Las estructuras del α-Fe y la kamacita están basadas en un empaquetamiento cúbico centrado en el cuerpo (Fig. 10.1*c*), mientras que la estructura de la taenita está basada en el empaquetamiento cúbico centrado en las caras (Fig. 10.1*a*).

Diagnóstico. El hierro puede reconocerse por su fuerte magnetismo, su maleabilidad y la pátina de óxido que normalmente cubre su superficie.

Yacimiento. Aparece como hierro terrestre y en meteoritos. El hierro en su estado elemental (nativo) es muy inestable en condiciones oxidantes en rocas de la corteza superior y en la atmósfera terrestre. El hierro está normalmente presente como Fe^{2+} o Fe^{3+} en óxidos como la magnetita, Fe_3O_4, o hematites, Fe_2O_3, o hidróxidos como la goethita, $FeO{\cdot}OH$. El hierro terrestre está considerado como constituyente magnético primario o como producto secundario formado por la reducción de los compuestos de hierro por el material carbonáceo asociado. La localización más importante está en la isla Disko, situada en la costa oeste de Groenlandia, donde se hallan fragmentos incluidos en el basalto que van desde el tamaño de granos a grandes masas de toneladas. Se han encontrado masas de ferroníquel en los condados de Josephine y Jackson, en Oregon.

Los meteoritos de hierro están compuestos fundamentalmente por un intercrecimiento regular de *kamacita* y *taenita*.

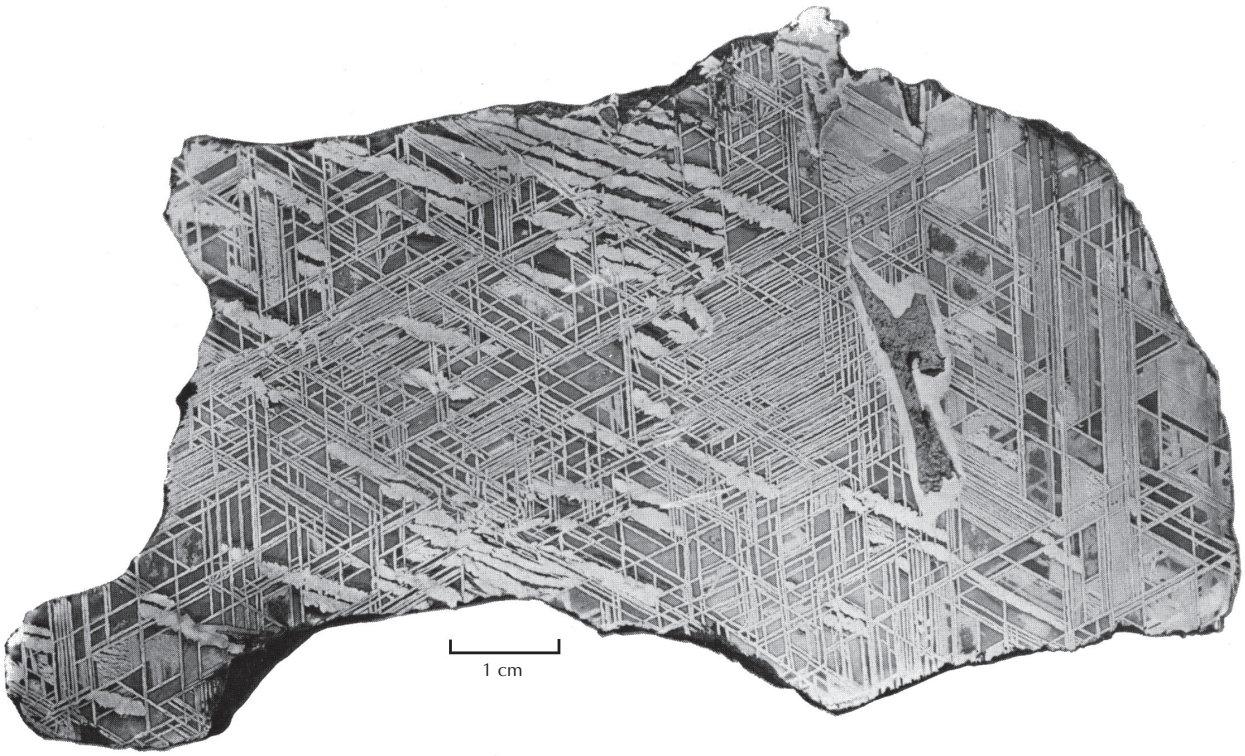


FIGURA 10.5 Diagrama de Widmanstätten en el meteorito de hierro de Edmonton (Kentucky). El diagrama octaédrico viene representado por la kamacita gruesa (visible) y las láminas muy delgadas de taenita (invisible). La inclusión irregular que aparece en el centro derecha es de troilita (FeS). (*Smithsonian Astrophysical Observatory,* cortesía, J. A. Wood. *Harvard Mineralogical Museum*.)

Evidencia de este intercrecimiento es el diagrama de Widmanstätten (Fig. 10.5) que aparece en las superficies pulimentadas y corroídas de estos meteoritos. Los meteoritos litosideritos están formados por mezclas de silicatos, kamacita, taenita y troilita (FeS).

10.2.2 Semimetales nativos

Los semimetales arsénico, antimonio y bismuto pertenecen a un grupo isoestructural con el grupo espacial $R\bar{3}m$. Sus estructuras, distintas a las de los metales, no pueden representarse por un simple empaquetamiento de esferas, pues cada átomo está algo más próximo a tres de sus vecinos que al resto de los átomos que le rodean. En la Fig. 10.6*a*, que representa la estructura del arsénico (o antimonio), las esferas se cortan entre sí a lo largo de áreas circulares planas. El enlace entre los cuatro átomos más próximos que forman grupos piramidales (Fig. 10.6*b*) es debido a la naturaleza covalente de estos enlaces. Esta covalencia está relacionada con la posición de estos semimetales en el grupo V del sistema periódico hacia el extremo electronegativo de una fila. El enlace relativamente fuerte a los cuatro vecinos más próximos da lugar a una estructura en capas como la indicada en la Fig. 10.6*b*. Estas capas son paralelas a {0001} y el débil enlace entre ellas da lugar a una fácil exfoliación. Los miembros de este grupo poseen propiedades físicas semejantes. Son quebradizos y conducen el calor y la electricidad mucho peor que los metales nativos. Estas propiedades reflejan un tipo de enlace intermedio entre el metálico y el covalente; es más fuerte y más direccional en sus propiedades que el puramente metálico, dando lugar a una simetría inferior.

Como el arsénico y el bismuto nativos son poco comunes como minerales, no incluimos descripciones detalladas de estas especies.

10.2.3 No-metales nativos

La estructura de los no-metales azufre, diamante y grafito es muy distinta a la de los metales y semimetales. El *azufre* se presenta ordinariamente en forma de cristal ortorrómbico

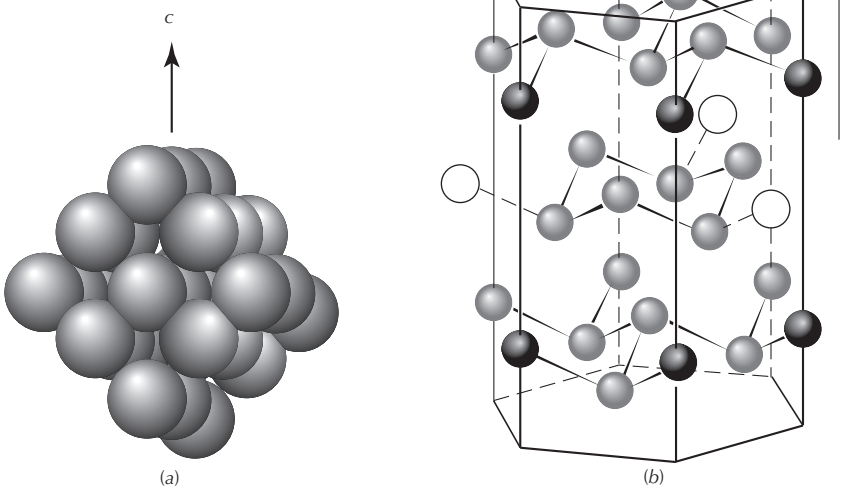


FIGURA 10.6 (*a*) Modelo de empaquetamiento compacto de la estructura del As y Sb. Las áreas planas representan el solapamiento entre átomos contiguos. (*b*) Dibujo ampliado de la estructura de As o Sb, mostrando las capas con pliegues de los grupos enlazados covalentemente, paralelos a {0001}.

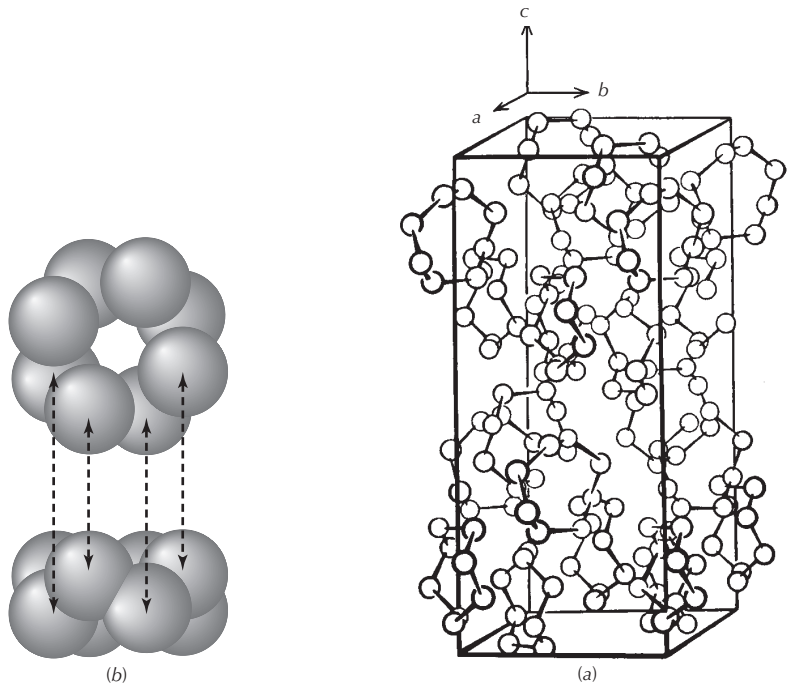


FIGURA 10.7 (*a*) Anillos S_8 en el azufre ortorrómbico, en visión paralela (bajo) y perpendicular (arriba) a los anillos. Celda unitaria de la estructura del azufre, mostrando la distribución de los anillos de S_8.

(con grupo espacial *Fddd*) en la naturaleza; dos polimorfos monoclínicos son muy raros en la naturaleza, pero son comunes sintéticamente. La estructura ortorrómbica del S es estable a la presión atmosférica por debajo de 95,5°C y una forma monoclínica es estable de 95,5 a 119°C. Este polimorfo monoclínico funde por encima de 119°C. La celda unitaria de la forma ortorrómbica del azufre contiene un gran número de átomos S, exactamente 128. Los átomos de azu-

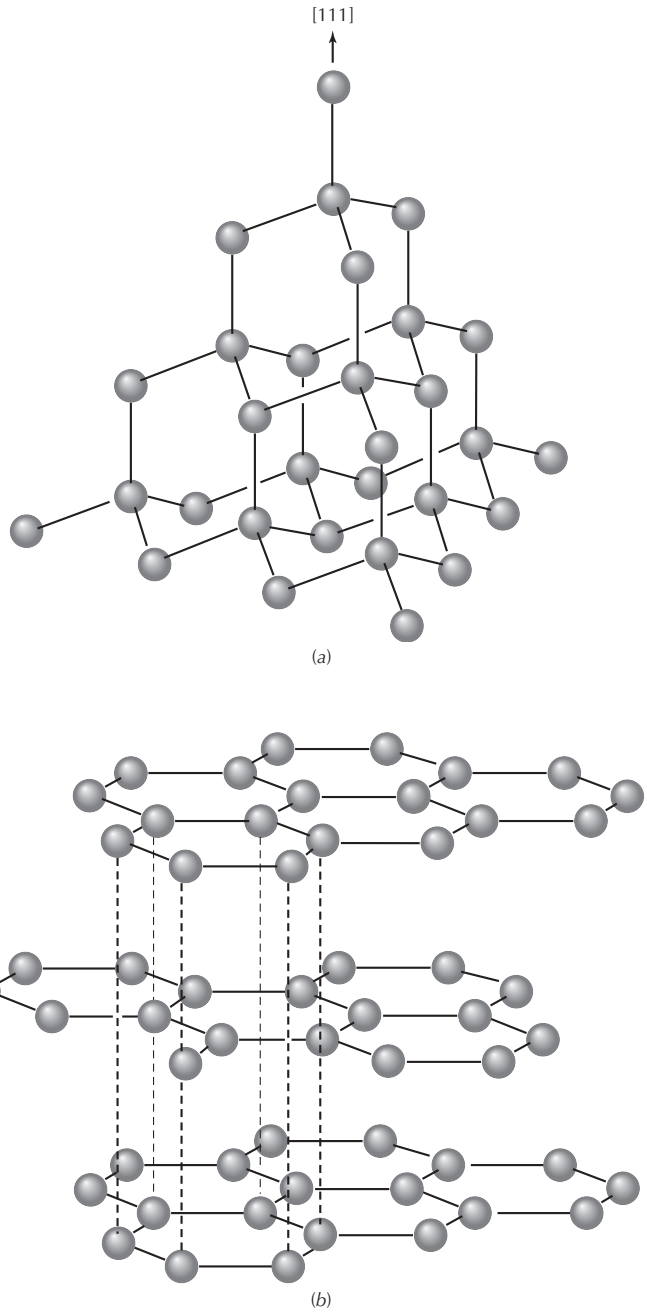


FIGURA 10.8 (*a*) Representación parcial de la estructura del diamante. El plano horizontal es (111). (*b*) La estructura del grafito en láminas // {0001}. Las líneas verticales de trazos unen los átomos de capas sucesivas. Estas líneas no representan enlaces.

fre están dispuestos en anillos plegados de ocho átomos que forman moléculas S_8 fuertemente enlazadas (Fig. 10.7*a*). Estos anillos se enlazan unos con otros por fuerzas de van der Waals dejando un espaciado relativamente ancho entre ellos (Fig. 10.7*b*); en las celdas unitarias existen 16 de estos anillos. Pequeñas cantidades de selenio (radio atómico, 1,16 Å) pueden sustituir al S (radio atómico 1,04 Å) en la estructura.

En las Figs. 10.8*a* y *b* pueden verse las estructuras de los dos polimorfos del carbono, *diamante* y *grafito*. El diamante tiene una estructura excepcional ligada y con fuertes enlaces,

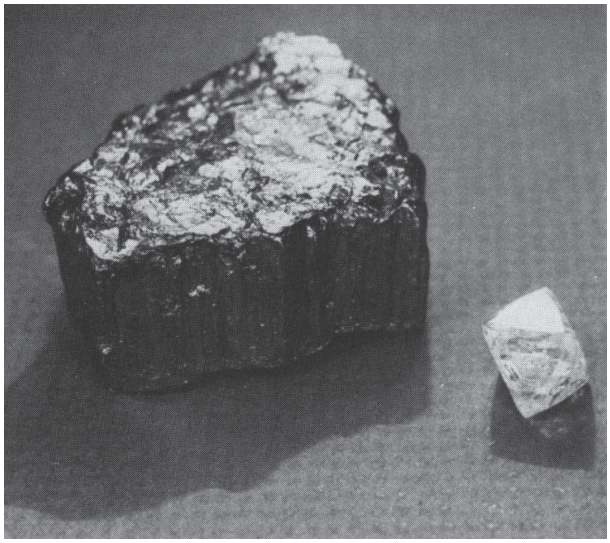


FIGURA 10.9 Los dos polimorfos del carbono: grafito fibroso de Buckingham, Quebec, Canadá y un diamante octaédrico de la República de Sudáfrica. (*Harvard Mineralogical Museum*.)

en la cual cada átomo de carbono está ligado por poderosos enlaces covalentes altamente direccionales a cuatro carbonos vecinos dispuestos en los vértices de un tetraedro regular. La estructura resultante, aun poseyendo fuertes enlaces, no tiene un empaquetamiento compacto, pues tan sólo está ocupado el 34% del espacio disponible. La presencia de hojas de átomos de carbono bastante espaciadas en la estructura, paralelas a los planos {111} (Fig. 10.8*a*), explica la exfoliación octaédrica prominente del diamante. Las hojas {111} son planos de máxima población atómica.

La estructura del grafito representada en la Fig. 10.8*b*, consta de anillos de seis miembros en los cuales cada átomo de carbono tiene tres vecinos próximos dispuestos en los vértices de un triángulo equilátero. Tres de los cuatro átomos de valencia pueden ser considerados como ligados por fuertes enlaces covalentes a sus tres vecinos más próximos en el plano de la hoja. El cuarto queda libre para vagar por la superficie de la hoja, creando una carga eléctrica dispersa que presta al grafito su conductibilidad eléctrica relativamente elevada. En contraste con esto, el diamante en el cual los cuatro electrones de valencia están fijados por enlaces covalentes es uno de los mejores aislantes eléctricos conocidos.

Las hojas que componen un cristal de grafito están apiladas de tal manera que están alternativamente en idéntica posición y las hojas intermedias están desplazadas una distancia igual a la mitad del periodo de identidad (Fig. 10.8*b*). La distancia entre hojas es mucho mayor que un diámetro atómico y las fuerzas de enlace de Van der Waals, perpendiculares a las hojas, son muy débiles. Esta gran separación y la debilidad del enlace, dan lugar a la perfecta exfoliación basal y al fácil deslizamiento paralelo a las hojas. Debido a esta estructura abierta, en el grafito sólo está ocupado el 21%, aproximadamente, del espacio disponible, y su peso específico es, proporcionalmente, menor que el del diamante. En la Fig. 10.9 se muestra una fotografía de los dos polimorfos del carbono, diamante y grafito.

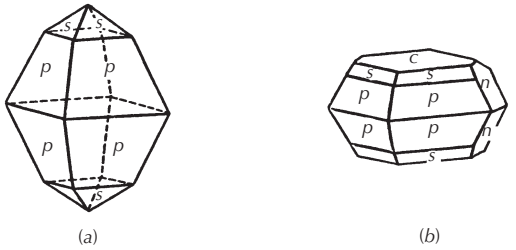


FIGURA 10.10 Cristales de azufre.

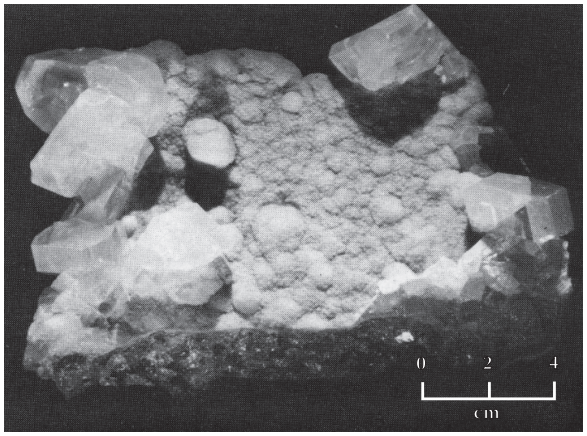


FIGURA 10.11 Cristales de azufre. Cinciana, Sicilia, Italia. (*Harvard Mineralogical Museum*.)

AZUFRE —S

Cristalografía. Ortorrómbico: 2/*m*2/*m*2/*m*. Con hábito piramidal (Fig. 10.10*a*), frecuentemente con dos bipirámides, prisma {011} y base en combinación (Figs. 10.10*b* y 10.11). Por lo común se encuentra en masas irregulares, imperfectamente cristalizadas; también en masas reniformes, estalactíticas, como incrustaciones y terrosas.

Fddd; a = 10,47, b = 12,87, c = 24,49 Å; Z = 128. *d's*: 7,76(4), 5,75(5), 3,90(10), 3,48(4), 3,24(6).

Propiedades físicas. *Fractura* concoidea o desigual. Frágil. **H** $1\frac{1}{2} - 2\frac{1}{2}$. **G** 2,05-2,09. *Brillo* resinoso. *Color* amarillo de azufre, que varía con las impurezas a tonalidades amarillas de verde, gris y rojo. Transparente a traslúcido. *Óptica*: (+); $\alpha = 1{,}957$, $\beta = 2{,}037$, $\gamma = 2{,}245$, 2V = 69°.

Mal conductor del calor. Cuando se sostiene un cristal en la mano cerca del oído, se le puede oír crujir debido a la dilatación de las capas superficiales, por el calor de la mano, mientras que el interior no lo hace debido a la poca conductibilidad calorífica del mineral. Los cristales de azufre deben ser, por lo tanto, tratados con cuidado.

Composición y estructura. El azufre nativo puede contener pequeñas cantidades de selenio en sustitución del S. La estructura del polimorfo ortorrómbico viene dada en la Fig. 10.7. Esta estructura consiste en grupos S_8 enlazados covalentemente en forma de anillos plegados. Estos anillos S_8 discretos y compactos están débilmente ligados entre sí por enlaces de van der Waals. La celda unitaria del azufre contiene 128 átomos de este elemento distribuidos entre 16 anillos S_8. El azufre funde a 119°C, dando lugar a un líquido en el cual los anillos S_8 enlazados covalentemente mantienen su identidad hasta 160°C. Los polimorfos monoclínicos (azufre α y β) son muy raros en la naturaleza.

Diagnóstico. El azufre puede ser reconocido por su color amarillo y por la facilidad con que arde. La ausencia de una buena exfoliación lo distingue del oropimente.

Yacimiento. El azufre se encuentra frecuentemente en o cerca del borde de los cráteres volcánicos activos o extinguidos donde se ha depositado procedente de los gases emanados en las fumarolas. Éstas pueden suministrar el azufre como producto directo de sublimación o por la oxidación incompleta del gas sulfhídrico. Se forma también por la acción de bacterias autótrofas. El azufre se encuentra a veces en filones, asociado a sulfuros metálicos y formado por la oxidación de éstos. Generalmente se le encuentra en las rocas sedimentarias de la época Terciaria y asociado a menudo a la anhidrita, al yeso y a la calcita; frecuente se le halla también en las rocas arcillosas; también en los depósitos bituminosos. Los grandes depósitos cercanos a Girgenti, Sicilia, son mundialmente famosos por los bellos cristales asociados a la celestina, yeso, calcita, aragonito. Existe también el azufre asociado a los volcanes de México, Hawai, Japón, Argentina y Ollagüe (Chile), donde es explotado a una altura de 5700 metros.

En los Estados Unidos los depósitos más productivos están en Texas y Louisiana. Allí el azufre está asociado a anhidrita, yeso y calcita en la roca que cubre los domos de sal. Existen diez o doce localidades productoras, pero la mayor es la de Boling Dome, en Texas, y Grand Ecaille, Plaquemines Parish, en Louisiana. Existen otros muchos depósitos explotables de azufre, como los asociados a domos de sal en México y los existentes en las aguas costeras no profundas del golfo de México. El azufre se obtiene de estos depósitos por el método de Frasch. Se inyecta en la zona del azufre agua sobrecalentada a presión, fundiendo el mineral; el aire comprimido obliga al azufre fundido a salir a la superficie.

Aproximadamente la mitad del azufre mundial se obtiene del elemento nativo; el resto se recupera como subproducto de la fusión de las menas de sulfuro, del gas natural sulfuroso y de la pirita.

En España es un mineral relativamente abundante. Se encuentra en capas interestratificadas con margas fosilíferas en Libros, Teruel.

Empleo. Se emplea en la fabricación de compuestos de azufre como el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y el ácido sulfhídrico (H_2S). Grandes cantidades de azufre elemental se utilizan en insecticidas, fertilizantes artificiales y en la vulcanización del caucho. Los compuestos de azufre se utilizan en la manufactura de jabones, textiles, curtidos, papel, pinturas, pigmentos y en el refinado del petróleo.

DIAMANTE —C

Cristalografía. Isométrico; $4/m\bar{3}2/m$. Los cristales suelen ser octaédricos, pero también cúbicos o dodecaédricos. Se observan con frecuencia caras curvas, sobre todo del octaedro (véase fig. 10.12) y hexaquisoctaedro (Figs. 10.13*a* y *b*; véase también Lámina I, nº 1 en el Capítulo 15). Los cristales pueden ser aplastados en {111}. Son corrientes las maclas en {111} (ley de la espinela), por lo general aplastadas paralelas al plano de macla (Fig. 10.13*c*). El *bort*, que es una variedad del diamante, tiene formas redondeadas y un aspecto externo basto, resultado de su condición de agregado radial o criptocristalino. Este término se emplea también al referirse a diamantes coloreados o defectuosos, sin valor como gema.

Fd3m; a = 3,567 Å, Z = 8. *d's*: 2,06(10), 1,26(8), 1,072(7), 0,813(6), 0,721(9).

Propiedades físicas. *Exfoliación* perfecta {111}. **H** 10 (la sustancia más dura conocida). **G** 3,52. *Brillo* adamantino; los cristales sin tallar tienen un aspecto graso característico. El alto índice de refracción, 2,42, y la fuerte dispersión de la luz proporcionan brillo y "fulgor" al diamante tallado. Normalmente su *color* es amarillo pálido o incoloro; también presenta tonalidades pálidas de rojo, anaranjado, verde, azul pardo. Son muy raras las tonalidades fuertes. El *carbonado*

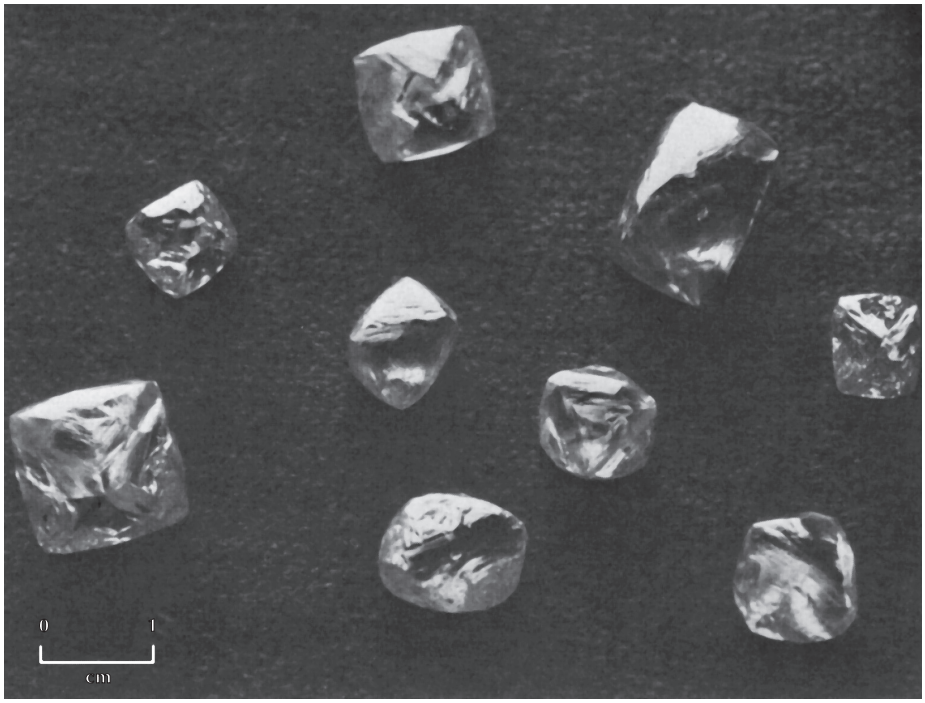


FIGURA 10.12 Cristales de diamante mostrando un hábito octaédrico pronunciado. (Cortesía del *Diamond Information Center*, New York, N. Y.)

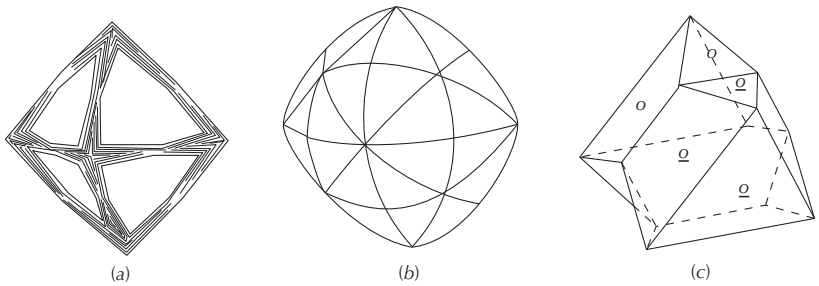


FIGURA 10.13 Cristales de diamante.

o *carbón* es un bort negro o negro grisáceo. No es exfoliable, es opaco y menos frágil que los cristales puros.

Composición, estructura y síntesis. Carbono puro. La estructura del diamante viene ilustrada en las Figs. 10.8*a* y 3.30. La Fig. 10.8*a* muestra que cada carbono está rodeado por cuatro átomos de carbono próximos en coordinación tetraédrica. Este es el resultado del enlace covalente en el cual cuatro electrones de valencia presentes en cada carbono completan los orbitales de enlace de los cuatro átomos por compartimiento electrónico. Cada átomo de carbono está así ligado a otros cuatro, formando una red continua. La Fig. 3.30*c* muestra la distribución centrada en las caras de los átomos de carbono en una celda unitaria cúbica y la Fig. 3.30 la posición de algunos de los elementos de simetría de la celda unitaria del diamante. La Fig. 3.30*e* ilustra muchas coplejidades del grupo espacial diamante, $F4_1/d\bar{3}2/m$ (abreviado, $Fd3m$).

El diamante, como es lógico por su elevado peso específico y su empaquetamiento compacto, es el polimorfo estable a presiones altas (véase Fig. 10.14). A bajas presiones o temperaturas es inestable respecto al grafito, y puede convertirse en este polimorfo a temperaturas moderadas. La razón de que el diamante y el grafito coexistan a temperaturas y presiones ordinarias (atmosféricas) es que la reacción

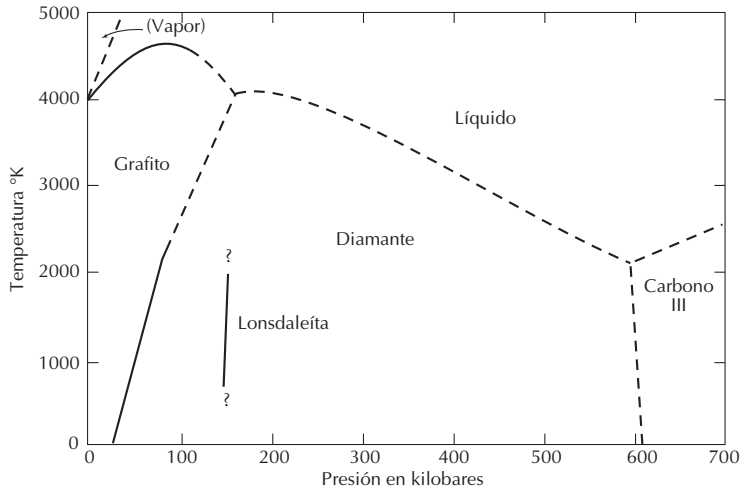


FIGURA 10.14 Diagrama de fases P-T del carbono, basado en datos experimentales de varias fuentes.

polimórfica reconstructiva es muy lenta. Para que el grafito se convierta en diamante es necesaria una temperatura extraordinariamente alta, es decir, una gran energía de activación que permita que los átomos de carbono en estructura grafítica debiliten por agitación térmica sus enlaces y queden en condiciones de construir la estructura diamante. El aumento de temperatura incrementa también la presión necesaria para verificar la reacción polimórfica.

La síntesis del diamante está basada en los campos de estabilidad de los diversos polimorfos del carbono, como indica la Fig. 10.14. Los primeros diamantes sintéticos fueron obtenidos en 1953 por el Dr. Erik Lundblad en los laboratorios de investigación de ASEA en Suecia. Para ello se requirieron condiciones experimentales de unos 2400 K y aproximadamente 76 kilobares mediante el uso de un aparato que simultáneamente ejercía presiones muy elevadas y resistía temperaturas extraordinariamente altas. La técnica ASEA no se patentó en aquel momento porque el mecanismo de síntesis no se comprendía totalmente. En 1955 la General Electric comenzó la manufactura sintética de pequeños diamantes. La producción mundial es ahora del orden de 300 millones de quilates[1], es decir, tres veces mayor que la producción de diamantes extraídos de minas terrestres. El material sintético, que es idéntico al de los diamantes naturales, ofrece la perspectiva de un suministro seguro e ilimitado de diamantes. En los últimos años las técnicas experimentales han producido diamantes de 11,1 quilates de buena calidad con cierta coloración amarilla; sin embargo, el proceso sintético es todavía demasiado costoso para ser competitivo con los diamantes más grandes de alta calidad de origen natural.

El éxito conseguido con la síntesis del diamante animó a experimentar con el nitruro de boro, BN, cuya estructura es similar a la del grafito. A presiones y temperaturas muy altas (del orden de 85 kilobares y 2100 K) el BN se transforma, de un modo semejante a la transición grafito-diamante, en nitruro de boro cúbico (con el nombre comercial de *borazón*). Este material es extraordinariamente resistente y duro, el segundo después del diamante. Se fabrica en cantidades considerables y se usa principalmente como abrasivo. Esta síntesis ilustra la aplicación de los conceptos cristaloquímicos desarrollados y ensayados originalmente en los minerales.

Después de la síntesis inicial del diamante, científicos de la General Electric Company continuaron los experimentos. En 1967 obtuvieron un cristal polimorfo hexagonal transparente de carbono cuya densidad e índice de refracción diferían muy poco de los correspondientes al diamante. Casi simultáneamente fue encontrado un diamante hexagonal en material meteorítico en el cráter del Cañón del Diablo, Arizona. A este polimorfo hexagonal del diamante, de ocurrencia natural, se le dio el nombre de *lonsdaleíta* (véase Fig. 10.14). La lonsdaleíta se ha encontrado también interpuesta con el diamante policristalino, *carbonado* en la *yakutiita*, llamado así por su presencia en depósitos aluviales al norte de Yakutia, Siberia. Es probable que la yakutiita sea el resultado del impacto de un meteorito.

Las investigaciones más recientes sobre la síntesis de diamantes está centrada en el depósito de diamantes de un

[1] Un quilate = 200 miligramos; unidad de peso de las gemas.

gas carbonáceo a presiones inferiores a la atmosférica, obteniéndose una lámina delgada de diamante policristalino en sustratos como el vidrio, silicio, volframio y molibdeno. Este proceso, llamado de posición química de vapor (CVD), proporciona películas delgadas de diamante que actúan como recubrimiento protector en diversos materiales y que pueden mejorar las cualidades de instrumentos cortantes y materiales semiconductores.

Diagnóstico. El diamante se distingue de los otros minerales de apariencia similar por su gran dureza, su brillo adamantino y su exfoliación.

Yacimientos. Los diamantes se han encontrado en los lugares más diversos, pero en cantidades notables sólo en unos cuantos sitios. Corrientemente, el diamante se encuentra en depósitos aluviales debido a su naturaleza química inerte, a su gran dureza y a su gran peso específico. En varias regiones de África y Norteamérica, así como en China, Venezuela, Australia, India y Siberia, los diamantes se han encontrado *in situ*. La roca donde aparecen se denomina *kimberlita*, nombre que procede de la localidad de Kimberley, Sudáfrica. Las kimberlitas constituyen un grupo de rocas ultrabásicas potásicas ricas en materias volátiles (principalmente CO_2) con una variación de composiciones megacristalizadas sobre un sustrato de grano fino (un megacristal es un cristal macroscópicamente visible que destaca claramente del sustrato más fino, aunque no se sabe con certidumbre si se formó en el mismo magma de la kimberlita). El conjunto megacristalizado puede estar formado por ilmenita, granate piropo, olivino, clinopiroxeno, flogopita, enstatita y cromita. La mineralogía de la matriz es compleja, pero puede incluir olivino, flogopita, perovskita, espinela y diópsido. Aunque estos cuerpos intrusivos varían en tamaño y en forma, muchos son aproximadamente circulares y tienen forma de tubo, y son conocidos por los gemólogos con el nombre inglés de "pipes" de diamantes. En las minas más profundas de Kimberley, Sudáfrica, el diámetro de los tubos decrecía con la profundidad y su explotación se interrumpió a unos 1000 metros, aunque los tubos continuaban. En la superficie, la kimberlita, por efecto de los agentes naturales, se convierte en una roca amarilla, "tierra amarilla", que en profundidad origina una "tierra azul", más dura. La relación entre los diamantes y la roca estéril varía de un tubo a otro. En la mina de Kimberley era de 1 : 8 000 000, pero en ocasiones puede ser 1 : 30 000 000.

Los diamantes se encontraron primeramente en la India, que fue su única fuente hasta que en 1725 se descubrieron en el Brasil. Los primeros diamantes procedían de las gravas de los ríos de la India central y meridional, estimándose que en esta área se produjeron 12 millones de quilates. La producción actual de la India es sólo de unos pocos centenares de quilates por año.

Después de su descubrimiento en las gravas de los lechos de los ríos en el estado de Minas Gerais, Brasil, los diamantes se encontraron también en los estados de Bahía, Goiás y Mato Grosso. La producción actual del Brasil se centra en las gravas de los ríos, aunque también se explotan extensos depósitos, situados en tierras altas, de gravas y arcillas que contienen diamantes. La variedad carbonada negra se obtiene sólo en Bahía, Brasil.

Los primeros diamantes africanos se descubrieron en 1866, en las gravas del río Vaal, Sudáfrica y en 1871 lo fueron en la "tierra amarilla" de varios "pipes" localizados cerca de la actual ciudad de Kimberley. Aunque algunos diamantes se recuperan todavía de las gravas, la principal producción de Sudáfrica procede de los "pipes" de kimberlita. Las minas se explotaron en un principio a cielo abierto, pero a medida que crecía la profundidad, se adoptaron los métodos subterráneos. La mina de diamantes mayor y más productiva del mundo es la Premier, a 38 km al este de Pretoria, Sudáfrica. Desde que comenzó su explotación en 1903 se han extraído 30 millones de quilates, es decir, 6 toneladas de diamantes. Allí se encontró en 1905 el diamante más grande del mundo, el Cullinan, con un peso de 3106 quilates. La prospección de diamantes ha localizado en Sudáfrica alrededor de 700 "pipes" de kimberlita, diques y galerías, en su mayoría improductivos. En 1966 entró en producción Finsch Mine, situada a 130 km al oeste de Kimberley. Más recientemente se han encontrado diamantes en kimberlitas de Boswana y al norte de Sudáfrica, en una zona próxima a la frontera con Zimbaue. El "pipe" más productivo de todos se descubrió en 1979 en Australia Occidental y se conoce como Argyle Mine. Este yacimiento está formado por *lamproíta*, nombre de roca que se refiere a material ígneo altamente potásico, pobre en aluminio y que consta de la siguiente variedad de minerales: flogopita, tremolita sódica rica en K (también llamada richterita), leucita, sanidina, diópsido y una variedad de silicatos y óxidos ricos en K, Ba, Ti y Zr.

En la provincia de El Cabo, en la costa desértica situada al sur de la desembocadura del río Orange, fueron descubiertos en 1927 depósitos sedimentarios que contenían diamantes de excelente calidad. Previamente, en 1908, se encontraron diamantes cerca de Luderitz, en la costa de Namibia. En otras partes de África se han encontrado diamantes, casi siempre aluviales, en una docena de países. Los principales productores son Zaire, Bostwana, Angola, Ghana, Sierra Leona, República de África Central y Tanzania. Zaire es con mucho el mayor productor y suministra a partir

de kimberlitas y depósitos en placeres menores el 20% de la producción mundial. Estos diamantes de Zaire son fundamentalmente de tipo industrial y sólo el 10% son de calidad gema. La Comunidad de Estados Independientes es también un productor importante de diamantes, procedentes de "pipes" y de placeres. Localidades importantes con yacimientos de kimberlita en el CIS son: Mir kimberlita, Mirny y Udachmaya kimberlita, ambas en Yakutia; y Pomorskaya kimberlita, Arkangel, Península de Omega, Mar Blanco. En los Urales y en Yakutia se encuentran importantes depósitos aluviales con diamantes en ríos y placeres.

Los principales productores de diamantes del mundo, con cifras correspondientes a 1988 (producción en bruto) y expresadas en millones de quilates, son:

Australia	35,0
Zaire	23,0
Botswana	15,0
CIS	12,0
Sudáfrica	9,0
Namibia	0,9
Sudamérica	0,85

(Datos de Wilks and Wilks, 1991).

En los Estados Unidos se han encontrado esporádicamente diamantes en varios lugares. Ocasionalmente se descubrieron pequeñas piedras en los lechos arenosos de la vertiente oriental de los montes Apalaches, en Virginia, al sur de Georgia. Los diamantes se han beneficiado también de las arenas auríferas del norte de California y sur del Estado de Oregon. Yacimientos esporádicos de diamantes han sido reconocidos en las morrenas glaciares en Wisconsin, Michigan y Ohio. En 1906 se encontraron diamantes en un "pipe" de lamproíta situado cerca de Murfreesboro, Pike County, Arkansas. Esta localidad, que recuerda los "pipes" de diamantes de Sudáfrica, ha facilitado alrededor de 40 000 piedras, pero actualmente es improductiva. En 1951, las viejas minas fueron abiertas a los turistas, a quienes se autorizaba la búsqueda de diamantes por una módica cuota. Actualmente es un parque nacional.

Empleo. *En la industria*. Los fragmentos de los cristales de diamante se emplean para cortar vidrio. El polvo fino se emplea para triturar y pulir diamantes y otras gemas. Para cortar las rocas y otros materiales duros se usan discos impregnados de polvo de diamante. Las brocas de acero están guarnecidas con diamantes, especialmente de la variedad criptocristalina, *carbonado*, para fabricar las taladradoras de diamante que se emplean en los trabajos de saneo minero. El diamante se emplea en el trefilado de alambres y en herramientas para rectificar las ruedas de afilar.

Gemas. El diamante es una de las gemas de más alto precio. Su valor depende de su dureza, de su brillo, que resulta de su alto índice de refracción, y de su fulgor, originado por fuerte dispersión de la luz. En general, las gemas más valiosas son las incoloras o con un color blanquiazul sin manchas. El color amarillo paja pálido, que presentan frecuentemente ciertos diamantes, les resta mucho valor. Las tonalidades fuertes de amarillo, rojo, verde o azul, conocidas como piedras preciosas, se aprecian mucho y llegan a tener precios muy altos. Se puede comunicar a los diamantes intensos matices de verde mediante irradiación con partículas nucleares de elevada energía, neutrones, deuterones y partículas alfa, y de azul exponiéndolos a la acción de electrones rápidos. Una piedra teñida de verde por irradiación puede tomar un color amarillo intenso mediante un tratamiento térmico adecuado. Estas piedras coloreadas artificialmente son difíciles de distinguir de las que tienen color natural. Véase Cap. 15 para un estudio más ampliado e ilustraciones de diamantes gemas.

Etimología. El nombre de diamante es una corrupción de la palabra griega *adamas*, que significa *invencible*. El término *adamantino* describe el brillo intenso de los minerales con un alto índice de refracción, tal como el diamante y la cerusita.

GRAFITO —C

Cristalografía. Hexagonal; 6/*m*2/*m*2/*m*. Se da en cristales tabulares de forma hexagonal con plano basal muy desarrollado. Son muy raras las otras formas. Ciertas trazas triangulares sobre la base son el resultado de deslizamientos según una pirámide $\{hh\overline{2}hl\}$. Aparece normalmente en masas hojosas o escamosas, pero puede ser radiado o granular.

$P6_3/mmc$. a = 2,46, c = 6,74 Å, Z = 4. *d's*: 3,36(10), 2,03(5), 1,675(8), 1,232(3), 1,158(5).

Propiedades físicas. *Exfoliación* perfecta {0001}. **H** 1-2 (marca fácilmente el papel y ensucia los dedos). **G** 2,23. *Brillo* metálico, algunas veces terroso opaco. *Color* y *huella*, negro. Tacto graso. Hojas flexibles pero no elásticas (Fig. 10.9).

Composición y estructura. Carbono. Ciertos grafitos impuros con óxido de hierro, arcilla u otros minerales. La estructura viene ilustrada en la Fig. 10.8*b*.

Diagnóstico. El grafito se reconoce por su color, su naturaleza hojosa y su tacto graso. Se distingue de la molibdenita por su color negro (la molibdenita tiene un tono azul) y por la huella negra que deja sobre la porcelana.

Yacimiento. Generalmente, el grafito se halla en rocas metamórficas, tales como calizas cristalinas, esquistos y gneis. Puede encontrarse en forma de grandes placas cristalinas o diseminado en pequeñas escamas en cantidad suficiente para formar una parte considerable de la roca. En estos casos, deriva probablemente de materia carbonosa de origen orgánico que se ha convertido en grafito durante el metamorfismo de la roca. Se conocen ejemplos de lechos de carbón que se han convertido, en mayor o menor grado, en grafito, como por ejemplo los carbones grafitosos de Rhode Island y los campos carboníferos de Sonora, México. El grafito parece también en grietas asociado a cuarzo, biotita, ortoclasa, turmalina, apatito, pirita y titanita, como en los depósitos de Ticnderoga, Nueva York. El grafito puede haberse formado en estas venas a partir de los hidrocarbonos que se introdujeron en su interior durante el metamorfismo regional y que provenían de las rocas carbonosas de los alrededores. El grafito aparece en algunas ocasiones como constituyente primario de las rocas ígneas, como en los basaltos de Ovifak, Groenlandia; en una isenita nefelínica, en la India; en una pegmanita, en el Maine. También se ha hallado en algunos meteoritos siderolitos en forma de nódulos.

Los depósitos más importantes por su producción se encuentran actualmente en China, el CIS, Corea del Norte, Corea del Sur, India y Méjico.

El yacimiento más importante en España se halla en Málaga y comprende las localidades de Marbella, Estepona y Ojen.

Artificial. El grafito artificial se fabrica a escala industrial en hornos eléctricos cargados con carbón de antracita o coque de petróleo como materia prima. El empleo de grafito artificial en los Estados Unidos es mucho mayor que el natural.

Empleo. Se emplea en la fabricación de crisoles refractarios para las industrias del acero, latón y bronce. El grafito en escamas para crisoles procede de Sri Lanka y de la República Malgache. Se emplea mucho como lubricante, mezclado con aceite. Mezclado con arcilla fina, forma la "mina" de los lápices. Se emplea también en la fabricación de pintura para la protección de estructuras de acero, en el barnizado de moldes y machos de fundición, o para fabricar electrodos, escobillas de generadores y en galvanotipia.

Etimología. Derivado de la palabra griega que significa *escribir*, como alusión a su empleo en los lápices.

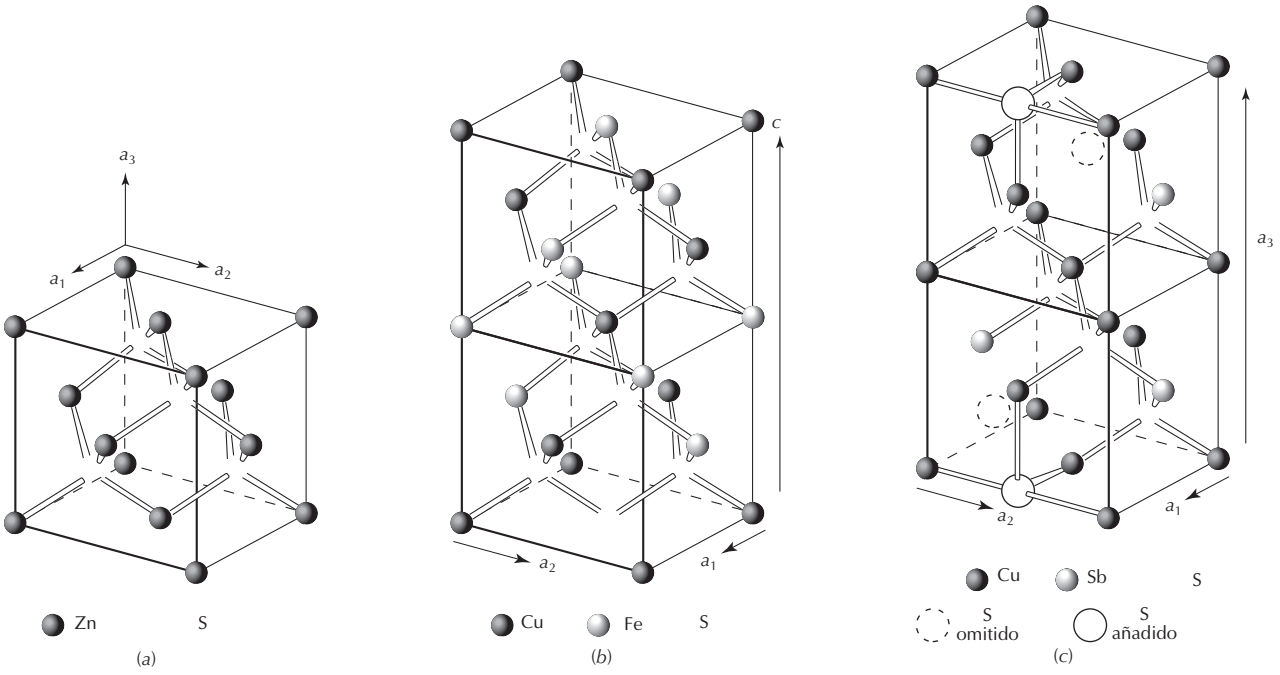


FIGURA 10.15 Estructura de la esfalerita y derivados. (*a*) Esfalerita, ZnS. Compárese esta ilustración con la de la Fig. 4.44*a*. (*b*) Calcopirita, $CuFeS_2$. (*c*) Tetraedrita, $Cu_{12}Sb_4S_{13}$. (Según B. J. Wuensch, 1974, en *Sulfide Mineralogy, Reviews in Mineralogy*, vol. 1. Mineralogical Society of America, Washington, D. C.)

10.3 SULFUROS

Los sulfuros constituyen una importante clase de minerales que incluye a la mayoría de las menas minerales. En ella se incluyen también los sulfoarseniuros, arseniuros y telururos, similares o los sulfuros, pero más raros.

La mayor parte de los minerales sulfuros son opacos y tienen colores distintivos y huellas de colores característicos. Los no opacos, como el cinabrio, el rejalgar y el oropimente poseen índices de refracción elevados y transmiten luz sólo en los bordes delgados.

La fórmula general de los sulfuros viene dada por X_m, Z_n, en donde X representa los elementos metálicos y Z el elemento no metálico. El orden de enumeración de los distintos minerales es el de la proporción decreciente $X : Z$.

Los sulfuros pueden ser divididos en reducidos grupos estructurales, pero no es posible hacer grandes generalizaciones respecto a su estructura. En muchos sulfuros simples se encuentra una coordinación tetraédrica u octaédrica regular alrededor del azufre; es lo que ocurre con la galena, PbS, que posee una estructura del tipo NaCl, y con la blenda o esfalerita (Fig. 10.15*a*). En sulfuros más complejos, así como en sulfosales, pueden encontrase poliedros de coordinación distorsionada (tetraedrita, Fig. 10.15*c*). Muchos de los sulfuros tienen enlaces iónicos y covalentes pero otros, que poseen la mayoría de las propiedades de los metales, tienen enlaces metálicos, al menos parcialmente. A continuación se abordan las estructuras y algunos aspectos de la cristaloquímica de algunos de los sulfuros más importantes (por ej., esfalerita, calcopirita, pirita, marcasita y covelina).

El ZnS se presenta con dos estructuras polimórficas distintas: la estructura de la esfalerita (Fig. 10.15*a*) y la estructura de la wurtzita (Fig. 10.23). En ambas el Zn está rodeado de cuatro azufres en coordinación tetraédrica, pero en la esfalerita los átomos de Zn están dispuestos en una red cúbica centrada en las caras y en la wurtzita están aproximadamente en posiciones de empaquetamiento hexagonal compacto. La distribución atómica en la esfalerita es como la del diamante (Figs. 10.8*a* y 4.44) en donde el carbono ha sido reemplazado por cantidades iguales de Zn y S. La greenoquita, CdS, es un sulfuro relativamente raro; es isoestructural con el ZnS, que se presenta en ambos tipos de estructura, esfalerita y wurtzita. La esfalerita natural presenta una sustitución extensa de Fe^{2+} y muy limitada de Cd^{2+} con respecto al Zn (tabla 5.3).

La calcopirita, $CuFeS_2$ posee una estructura (Fig. 10.15*b*) que puede deducirse de la esfalerita por la sustitu-

SULFUROS, SULFOARSENIUROS Y ARSENIUROS

Acantita (Argentita)	Ag_2S	Cinabrio	HgS
Calcosina	Cu_2S	Rejalgar	AsS
Bornita	Cu_5FeS_4	Oropimente	As_2S_3
Galena	PbS	Estibina	Sb_2S_3
Blenda (Esfalerita)	ZnS	Pirita	FeS_2
Calcopirita	$CuFeS_2$	Cobaltina	(Co,Fe)AsA
Pirrotina	$Fe_{1-x}S$	Marcasita	FeS_2
Niquelina	NiAs	Arsenopirita	FeAsS
Millerita	NiS	Molibdenita	MoS_2
Pentlandita	$(Fe, Ni)_9S_8$	Skutterudita	$(Co, Ni)As_3$
Covelina	CuS		

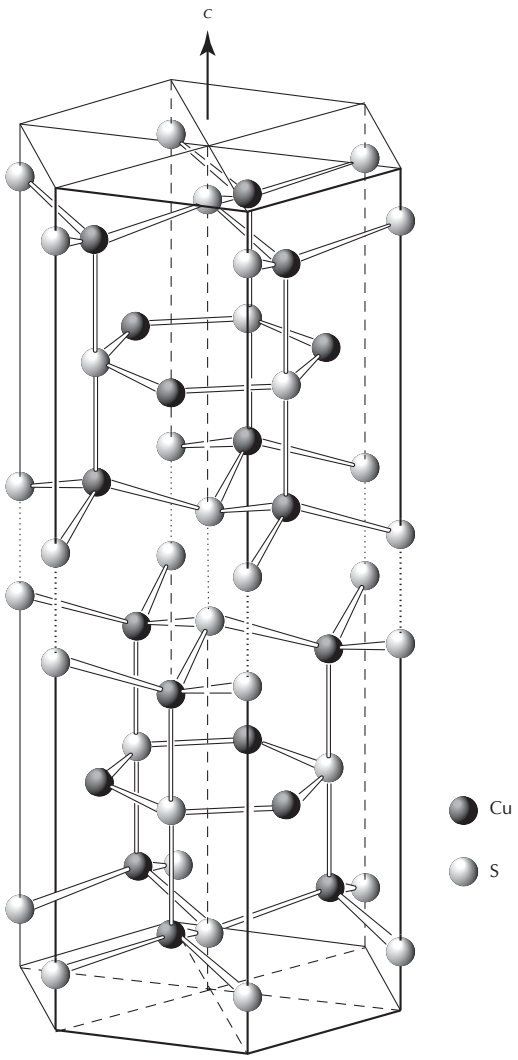


FIGURA 10.16 Estructura de la covelina, CuS. Las líneas de puntos indican enlaces S-S covalentes. (Según B. J. Wuensch, 1974, en *Sulfide Mineralogy, Reviews in Mineralogy*, vol. 1. Mineralogical Society of America, Washington, D. C.)

ción regular de los iones de Cu y Fe por Zn; esto origina un duplicado de la celda unitaria. La estannita, Cu_2FeSnS_4, posee una estructura basada en la esfalerita en la cual las capas ordenadas de Fe y Sn alternan con capas de Cu (la calcopirita puede también escribirse en la forma $Cu_2Fe_2S_4$; este hecho ilustra químicamente su gran semejanza con Cu_2FeSnS_4).

La *covelina*, CuS, es un ejemplo de una sustancia químicamente muy simple con una estructura bastante compleja (Fig. 10.16), en la cual parte del Cu está coordinada tetraédricamente por cuatro S y parte coordinada por tres S en forma de triángulo. Por tanto, la estructura puede considerarse como formada por láminas de triángulos CuS_3 situadas entre

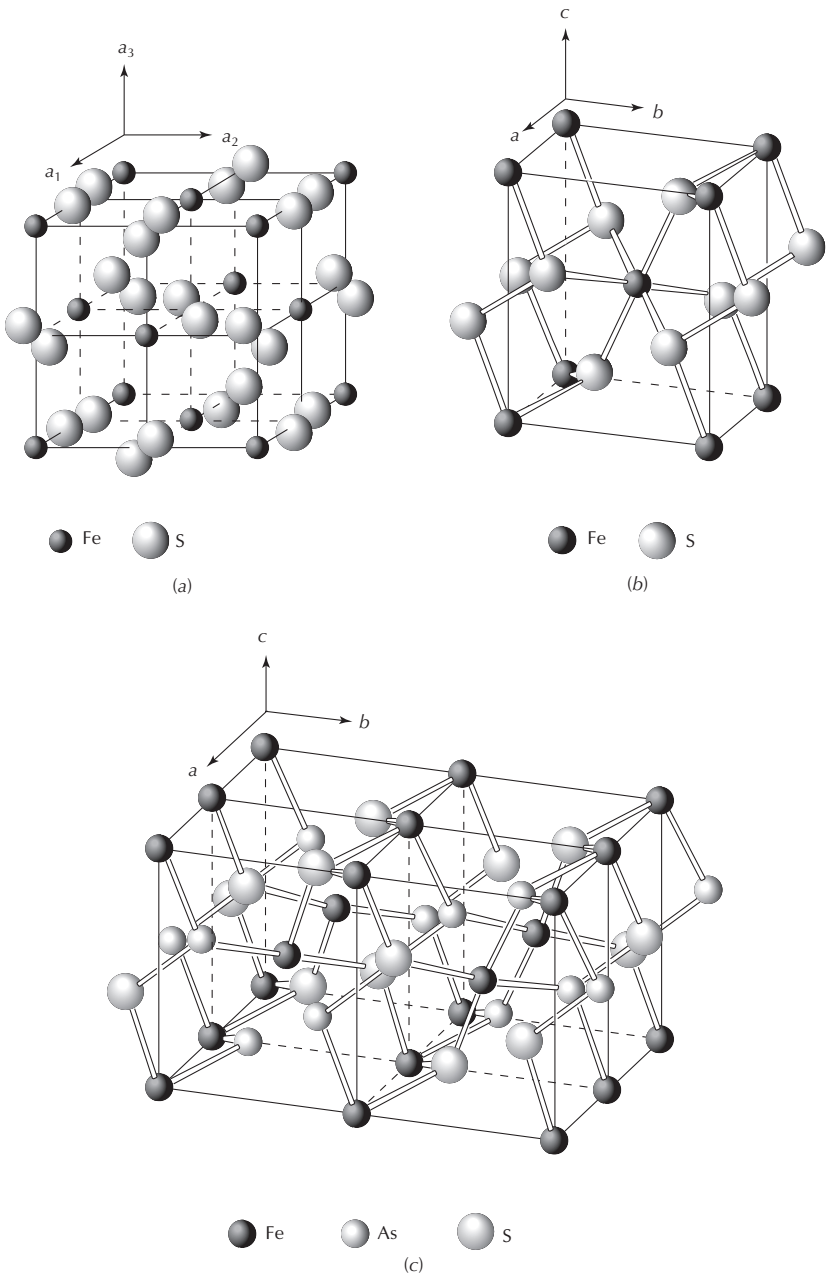


FIGURA 10.17 (*a*) Estructura de la pirita, basada en la del NaCl (compárese con Fig. 3.31). Obsérvense los grupos S_2 en los azufres dispuestos compactamente. (*b*) Estructura de la marcasita mostrando la coordinación de los iones con los vecinos más próximos. (*c*) Estructura de la arsenopirita, FeAsS, un derivado de la estructura de la marcasita. (*b* y *c* según B. J. Wuensch, 1974, en *Sulfide Mineralogy*, *Reviews in Mineralogy*, vol. 1. MIneralogical Society of America, Washington, D. C.)

capas dobles de tetraedros CuS_4; los enlaces azufre-azufre covalentes conectan las capas.

La *pirita*, FeS_2, posee una estructura cúbica, como se indica en la Fig. 10.17*a*. La estructura contiene pares S_2 enlazados covalentemente, que ocupan la posición del Cl en una estructura del tipo NaCl. La estructura de la pirita puede considerarse como derivada de la estructura NaCl, en donde el Fe ocupa las posiciones del Na en el NaCl. Otra forma polimorfa del FeS_2 es la marcasita (Fig. 10.17*b*), que tiene una estructura ortorrómbica. Esta estructura, al igual que la de la pirita, contiene pares S_2 muy próximos. No está todavía muy claro cuáles son los campos de estabilidad de los dos polimorfos, pirita y marcasita. A partir de los yacimientos geológicos se llegaría a la conclusión de que la marcasita se presenta en un intervalo de baja y media temperatura en las rocas sedimentarias y en las venas metalíferas. Sin embargo, la pirita se presenta como constituyente magmático (alta *T*).

La estructura de la *arsenopirita*, FeAsS, puede deducirse de la marcasita (FeS_2 o FeSS) (Fig. 10.17*c*), en donde un S por fórmula unitaria viene reemplazado por As. La coordinación general de los átomos en la marcasita y FeAsS es aproximadamente la misma en ambas estructuras.

Acantita —Ag_2S

Cristalografía. Monoclínico, 2/*m* por debajo de 173°C; isométrico, $4/m\bar{3}2/m$, por encima de 173°C. Los cristales polimorfos, maclados en la forma de alta temperatura, muestran comúnmente las formas cúbica, octaédrica y dodecaédrica, aunque con frecuencia se disponen en grupos reticulados o ramificados. Comúnmente se presentan en forma masiva o en capas. Históricamente la acantita ha sido denominada argentita.

$P2_1/n$; $a = 4{,}23$, $b = 6{,}93$, $c = 7{,}86$ Å, $\beta = 99°35'$, $Z = 4$. *d's*: 2,60(10), 2,45(8), 2,38(5), 2,22(3), 2,09(4).

Propiedades físicas. **H** 2-2$\frac{1}{2}$. **G** 7,3. Muy séctil. Puede cortarse con un cuchillo como el plomo. *Brillo* metálico. *Color* negro. *Huella* negra, brillante. Opaco. Brillante en superficie reciente que, al ser expuesta al aire, se torna negra mate, debido a la formación de un sulfuro terroso.

Composición y estructura. Ag = 87,1%; S = 12,9%. El Ag_2S posee el grupo espacial $P2_1/n$ por debajo de 173°C e $Im3m$ por encima de 173°C. Al enfriarse por encima de 173°C, se forman maclas penetrantes que presentan el aspecto aparente de cristales cúbicos, llamados *argentita* por los mineralogistas. Sin embargo, parece que la acantita es la única forma estable del Ag_2S a temperaturas ordinarias.

Diagnóstico. La acantita puede distinguirse por su color, sectilidad y gran peso específico

Yacimiento. La acantita es un importante mineral primario de plata, que se encuentra en filones asociado a plata nativa, plata roja, polibasita, estefanita, galena y blenda. Puede ser también de origen secundario. Se halla también en inclusiones microscópicas en la denominada galena argentífera. La acantita es una mena importante de plata en las minas de Guanajuato y de otras partes en México. Localidades europeas importantes son Freiberg, en Sajonia; Joachimsthal, Schemnitz y Kremnitz, en Checoslovaquia; Kongsberg, en Noruega. En los Estados Unidos ha sido una mena importante en Nevada, especialmente en Comstock Lode y Tonopah. Se encuentra también en los distritos de plata de Colorado, y en Butte, Montana, asociado a menas de cobre. En España, fue abundante en Guadalcanal.

Empleo. Importante mena de plata.

Etimología. El nombre de argentita procede del latín *argentum*, que significa plata. El nombre de acantita viene de una palabra griega que significa *espina*, por la forma de sus cristales.

CALCOSINA —Cu_2S

Cristalografía. Monoclínico, pseudo-ortorrómbico; 2*m* o *m* (por debajo de 105°C); hexagonal por encima de esta temperatura. Cristales muy raros, normalmente pequeños y tabulares de aspecto hexagonal; estrías paralelas al eje *a* (Fig. 10.18). Por lo común, finamente granulado y compacto.

$P2_1/c$ o Pc, $a = 11{,}82$, $b = 27{,}05$, $c = 13{,}43$ Å, $Z = 96$. *d's*: 3,39(3), 2,40(7), 1,969(8), 1,870(10), 1,695(4).

Propiedades físicas. *Exfoliación* {110} insignificante. *Fractura* concoidea. **H** 2$\frac{1}{2}$-3. **G** 5,5-5,8. *Brillo* metálico. Imperfectamente séctil. *Color* gris plomo brillante, que se torna negro mate al ser expuesto al aire. *Huella* negra grisácea. Algunas calcosinas son blandas y fuliginosas.

Composición y estructura. Cu = 79,8%; S = 20,2%. Puede contener pequeñas cantidades de Ag y Fe. Por debajo de

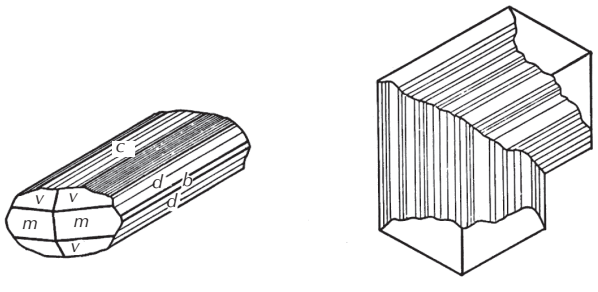


FIGURA 10.18 Cristales de calcosina.

105°C su estructura está basada en el empaquetamiento hexagonal compacto de átomos de azufre con un grupo espacial monoclínico. Por encima de 105°C pasa a la calcosina alta con grupo espacial $P6_3/mmc$.

Diagnóstico. La calcosina se distingue por su color gris plomo y su sectilidad.

Yacimiento. La calcosina es una de las menas de cobre más importantes. Han sido hallados bellos cristales en Cornwall, Inglaterra, y en Bristol, Connecticut. Se presenta como mineral primario en venas con bornita, calcopirita, enargita y pirita. Aparece, principalmente, como un mineral supergénico en zonas de enriquecimiento de los depósitos de sulfuros. En condiciones superficiales los sulfuros de cobre primario se oxidan; los sulfatos solubles formados se desplazan hacia abajo y reaccionan con los minerales primarios formando calcosina, enriqueciéndose así la mena en cobre. La capa freática es el límite inferior de la zona de oxidación, donde puede formarse una "manta de calcosina" (Fig. 14.21). Muchas minas famosas de cobre deben su magnitud a este proceso de enriquecimiento secundario. Entre ellas se hallan: Río Tinto, España; Ely, Nevada; Morenci, Miami, y Bisbee, Arizona; y Butte, Montana.

Gran parte del cobre mundial se beneficia hoy de lo que se denomina "cobre porfídico". En estos depósitos, el mineral de cobre primario diseminado en la roca, normalmente un pórfido, se ha transformado, al menos en parte, en calcosina y así enriquecido ha formado una mena explotable. La riqueza en cobre de dichos depósitos es escasa, raras veces superior al 1 ó 2%, y puede ser de sólo un 0,40%.

Empleo. Mena importante de cobre.

Etimología. Del griego *calkos*, que significa cobre.

Especies parecidas. La *digenita*, Cu_9S_5, azul a negra, asociada a la calcosina. La *djurleíta*, $Cu_{31}S_6$, mineral de color entre gris-oscuro y negro, aparece en muchos de los depósitos de cobre porfídico de la Cordillera Occidental (EE.UU.).

BORNITA —Cu_5FeS_4

Cristalografía. Tetragonal, $\bar{4}2m$, por debajo de 228°C. La forma más común en las menas es la tetragonal. Se encuentra raramente en cristales pseudocúbicos mal formados y menos todavía en cristales dodecaédricos y octaédricos. Normalmente, aparece en cristales masivos.

$P\bar{4}2_1c$. a = 10,94, c = 21,88 Å; Z = 16, *d's*: 3,31(4), 3,18(6), 2,74(5), 2,50(4), 1,94(10).

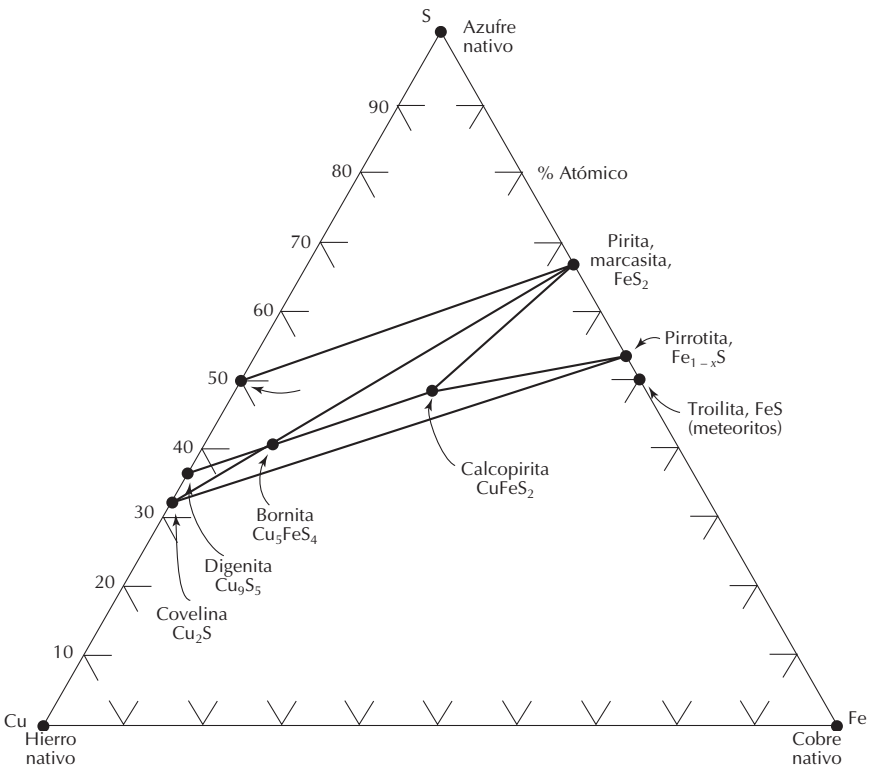


FIGURA 10.19 Algunos de los sulfuros más comunes representados en el sistema Cu-Fe-S. Muchos de estos sulfuros (por ej. la bornita y la calcopirita) presentan soluciones sólidas, especialmente de Cu y Fe; esto no se muestra en el diagrama. Las líneas de enlace conectan los pares de minerales que corrientemente se presentan asociados. Los triángulos indican coexistencias de tres sulfuros. La coexistencia Fe-FeS es común en los meteoritos de hierro.

*Fm*3*m*, $a = 5{,}50$ Å, $Z = 1$, *d's*: 3,17(5), 2,75(5), 1,94(10), 1,66(1).

Propiedades físicas. **H** 3. **G** 5,06-5,08. *Brillo* metálico. *Color* en superficie reciente, bronce pardo, pero al aire se cubre rápidamente con una pátina jaspeada, púrpura y azul (por eso se llama también mineral de pavo) y, finalmente, casi negra. *Huella* negra grisácea.

Composición y estructura. Cu 63,3%, Fe 11,2%, S 25,5% para el Cu_5FeS_4 estequiométrico. Presenta solución sólida extensa con el sistema Cu-Fe-S. En la Fig. 10.19 puede apreciarse junto con las composiciones de otros sulfuros comunes de este sistema. La estructura del polimorfo de alta *T* de la bornita es relativamente compleja, con átomos de azufre en la red cúbica centrada en las caras y los átomos Cu y Fe en coordinación tetraédrica en el S. La estructura de la forma de baja temperatura se deriva de la forma de alta *T* con la adición de defectos. Esta estructura con defectos da lugar a grandes variaciones en los contenidos de Cu, Fe y S.

Diagnóstico. La bornita se distingue por su característico color de bronce en fractura reciente y por su tono purpúreo.

Alteración. La bornita se altera rápidamente a calcosina y covelina.

Yacimiento. La bornita es una mena de cobre muy generalizada, que normalmente se encuentra con otros sulfuros (calcosina, calcopirita, covelina, pirrotita y pirita; véase Fig. 10.19) en depósitos hipogénicos. Es menos frecuente encontrarla como mineral supergénico, formado en la parte superior de la zona de enriquecimiento de los filones de cobre. Se encuentra diseminada en rocas básicas, en depósitos metamórficos de contacto, en depósitos de reemplazamiento y en pegmatitas. Cuantitativamente no es una mena tan importante como la calcosina o la calcopirita.

Se han encontrado buenos cristales de bornita asociados a cristales de calcosina en Bristol, Connecticut, y en Cornwall, Inglaterra. En grandes masas, en Chile, Perú, Bolivia y México. En los Estados Unidos se encuentra en las minas Magma, Pioneer, Arizona; Butte, Montana; Engels, Plumas County, California; Halifax County, Virginia; Superior, Arizona.

Asociada a otras menas de cobre en Riotinto, España.

Empleo. Mena de cobre.

Etimología. Bornita, en honor del mineralogista alemán von Born (1742-1791).

GALENA —bSP

Cristalografía. Isométrica; $4/m\bar{3}2/m$. La forma más corriente es el cubo; a veces aparece truncado el octaedro (Figs. 10.20 y 10.21). Son raros los dodecaedros y los triaquisoctaedros.

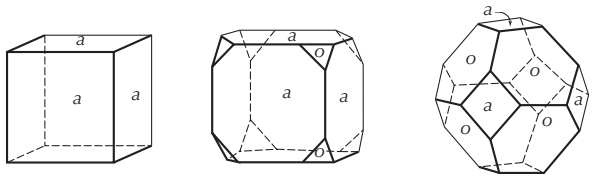


FIGURA 10.20 Cristales de galena.

*Fm*3*m*; $a = 5{,}936$ Å, $Z = 4$. *d's*: 3,44(9), 2,97(10), 2,10(10), 1,780(9), 1,324(10).

Propiedades físicas. *Exfoliación* perfecta {001}. **H** $2\frac{1}{2}$. **G** 7,4-7,6. *Brillo* metálico reluciente. *Color* y *huella* gris plomo.

Composición y estructura. Pb 86,6%; S 13,4%. Los análisis dan casi siempre presencia de plata, probablemente como mezcla de minerales de plata, tales como la acantita o tetraedrita, aunque la plata también se halla en solución sólida. La galena puede contener también pequeñas cantidades de zinc, cadmio, antimonio, arsénico y bismuto. El azufre puede estar sustituido por el selenio y se conoce una serie completa PBS-PbSe. La galena tiene estructura tipo ClNa, con Pb en lugar del Na y S en lugar del Cl.

Diagnóstico. La galena puede reconocerse fácilmente por su buena exfoliación, su gran peso específico, por ser blanda y por la huella gris plomo.

Alteración. Por oxidación, la galena se convierte en anglesita, $PbSO_4$, y cerusita, $PbCO_3$.

Yacimiento. La galena es un sulfuro muy corriente, que se encuentra en filones asociado a blenda, pirita, marcasita, calcopirita, cerusita, anglesita, dolomita, calcita, cuarzo, baritina y fluorita. Cuando se halla en filones hidrotermales, la galena se asocia a menudo con minerales de plata; frecuentemente contiene plata, convirtiéndose, en estos casos, en una mena de este metal. Una gran parte de la producción de plomo se obtiene como producto secundario de menas beneficiadas especialmente por su contenido en plata. En un segundo tipo de depósito tipificado por las menas de plomo y zinc del valle del Mississippi, la galena, asociada con la esfalerita, se encuentra en filones, rellenando espacios libres en la roca, o en depósitos de reemplazamiento en calizas. Éstos son depósitos de baja temperatura localizados a poca profundidad y usualmente contienen poca plata. La galena se encuentra también en depósitos metamórficos de contacto, en pegmatitas y como diseminaciones en rocas sedimentarias.

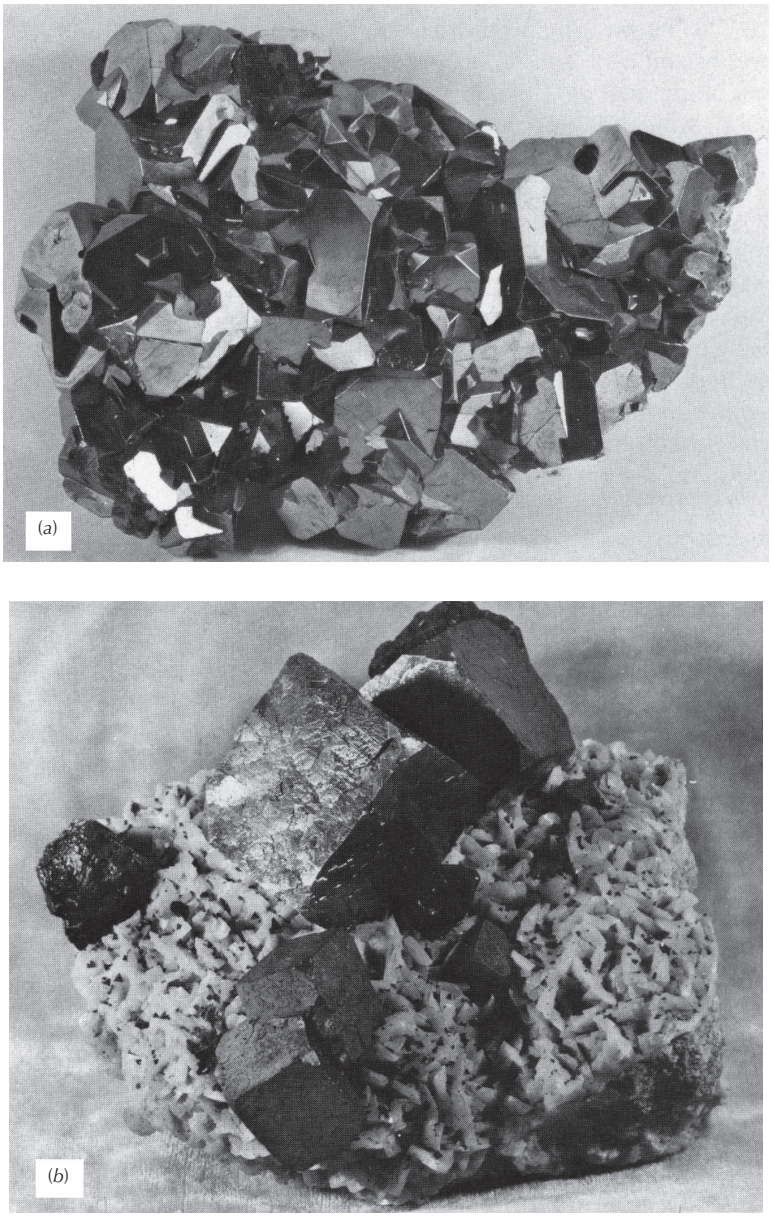


FIGURA 10.21 (*a*) Cristales de galena, Mina Wellington, Breckenridge, Colorado. (*b*) Galena sobre cristales de esfalerita y dolomita. Jasper County, Missouri. (Ambas especies proceden del Harvard Mineralogical Museum.)

Las localidades más famosas son: Freiberg, Sajonia; las montañas del Harz, Alemania; Pribram, Bohemia, Checoslovaquia; Derbyshire y Cumbria, Inglaterra; mina Sullivan, Columbia Británica, y Broken Hill, Australia.

En el pasado existieron en los Estados Unidos muchos distritos productores de plomo, pero hoy quedan sólo tres de importancia. El principal de éstos se encuentra al sudoeste de Missouri y casi el 90% de la producción de los EE.UU. Allí la galena está diseminada a través de la caliza. Una pequeña producción procede del distrito de Coeur d'Alene, Idaho, donde la galena es el principal mineral en las venas de plomo y plata, y de Colorado, donde el plomo se recupera principalmente como subproducto de la explotación de las minas de plata y oro. Antiguamente, el distrito de los Tres Estados, Missouri, Kansas y Oklahoma, fue un importante productor de plomo. En esta región, la galena, asociada a la esfalerita,

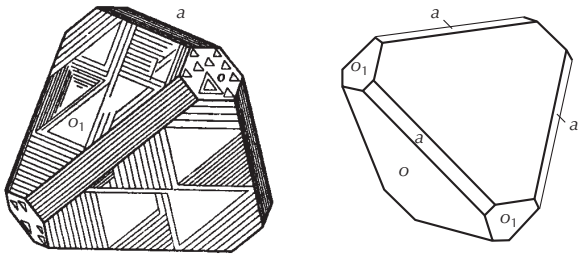


FIGURA 10.22 Cristales de esfalerita.

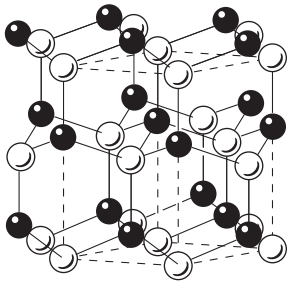


FIGURA 10.23 Polimorfo tipo wurtzita del ZnS. Véase Fig. 10.15*a* para el polimorfo de la esfalerita.

se presentaba en filones irregulares y bolsados en caliza. Como los cristales crecían en espacios abiertos, el distrito de los Tres Estados es famoso por sus abundantes especies cristalizadas de galena, esfalerita, marcasita, calcopirita, calcita y dolomita.

Es muy abundante y extendida en España. Entre las localidades importantes que la contienen se encuentran Linares, La Carolina, Sierra Almagrera, Papiol, etc.

Empleo. Prácticamente es la única fuente del plomo y una importante mena de plata. El plomo metálico se emplea, especialmente, para obtener las placas de los acumuladores eléctricos y para la producción de tubos, láminas y perdigones. El plomo se convierte en los óxidos (*litargirio* PbO y *minio* Pb_3O_4) que se emplean en la fabricación del vidrio y el barniz de la loza, y en blanco de plomo (un carbonato básico de plomo), que es el ingrediente principal de muchas pinturas. Sin embargo, este último uso se ha visto disminuido por la naturaleza venenosa del plomo. Igualmente disminuye también su empleo como aditivo antidetonante de la gasolina a causa de la contaminación ambiental. Es uno de los ingredientes principales en aleaciones para soldaduras (plomo y estaño), en el metal tipográfico (plomo y antimonio) y en las aleaciones de bajo punto de fusión (plomo, bismuto y estaño). Se emplean grandes cantidades de plomo como pantallas de protección contra el uranio y otras sustancias radiactivas.

Etimología. El nombre galena deriva del nombre latino *galena* aplicada en un principio a las menas de plomo.

Especies similares. *Altaíta* PbTe y *alabandita*, MnS que, como la galena, tienen estructura tipo cloruro sódico, NaCl.

ESFALERITA (Blenda de zinc) — ZnS

Cristalografía. Isométrico; $\bar{4}3m$. Formas corrientes son el tetraedro, dodecaedro y cubo (Fig. 10.22), pero los cristales, frecuentemente muy complejos y por lo general mal formados o en agregados redondeados, suelen ser maclas polisintéticas {111}. Se encuentra generalmente en masas exfoliables o granulares. Compacta, botrioidal, criptocristalina.

$F\bar{4}3m$; a = 5,41 Å; Z = 4. *d's*: 3,12(10), 1,910(8), 1,631(7), 1,240(4), 1,106(5).

Propiedades físicas. *Exfoliación* perfecta {011}, pero la blenda de ciertas localidades tiene un grano tan fino que no presenta exfoliación. **H** $3\frac{1}{2}$-4. **G** 3,9-4,1. *Brillo* no metálico y resinoso a submetálico; también adamantino. *Incolora* cuando es pura, y verde, cuando es casi pura. Corrientemente de color amarillo, castaño a negro, oscureciéndose con el aumento de contenido de hierro. También *roja* (*rubí de cinc*). Transparente a translúcida. *Huella* blanca a amarillo y castaño.

Composición y estructura. Zn 67%; S 33% cuando es pura. Casi siempre contiene hierro en una proporción que depende de la temperatura y de la química de sus alrededores. Si el Fe está en exceso por asociación con la pirrotita, la cantidad de FeS en la esfalerita puede alcanzar 50 moles por ciento (véase también tabla 5.3). Si la esfalerita y la pirrotita cristalizan juntas, la cantidad de hierro indica la temperatura de formación y la blenda se convierte en un termómetro geológico. El manganeso y el cadmio se hallan normalmente presentes, aunque en pequeñas cantidades, en solución sólida (véase Tabla 5.3).

La estructura de la esfalerita es semejante a la del diamante, con la mitad de los átomos de carbono reemplazados por Zn y la otra mitad por S (Figs. 4.44, 10.8*a* y 10.15*a*). La esfalerita se considera como el polimorfo cúbico a baja temperatura del ZnS y la wurtzita como el polimorfo de alta temperatura, estable por encima de 1020°C a 1 atmósfera de presión. El polimorfo *wurtzita* (grupo espacial $P6_3mc$), con átomos de Zn en empaquetamiento hexagonal compacto (Fig. 10.23), presenta un gran número de secuencias de apilamiento, llamadas *politipos* de wurtzita, que difieren en la longitud de sus ejes *c*. Por ejemplo, el politipo 4*H* posee un eje *c* de 12,46 Å y el politipo 8*H* un eje *c* de 24,96 Å (*H* = hexagonal).

Diagnóstico. La blenda puede reconocerse por su brillo resinoso brillante y su exfoliación perfecta. Las variaciones oscuras (*black jack*) pueden reconocerse por la huella castaño rojiza, siempre más clara que el mineral en sí.

Yacimiento. La blenda, la mena más importante del zinc, es un mineral extremadamente corriente. Por su yacimiento y modo de origen está íntimamente relacionada con la galena, con la cual corrientemente se asocia. En los depósitos poco profundos del distrito del Triple Estado de Missouri, Kansas y Oklahoma (actualmente exhaustos) estos minerales están asociados a marcasita, calcopirita, calcita y dolomita. La esfalerita con pequeñas proporciones de galena se presenta en filones hidrotérmicos y en depósitos de reemplazamiento asociados a pirrotita, pirita y magnetita. La esfalerita se encuentra también en filones en las rocas ígneas y en depósitos metamórficos de contacto.

El zinc es explotado en cantidades importantes en más de 40 países. Aunque en algún punto los minerales de zinc son la hemimorfita y la smithsonina, y en Franklin, New Jersey, lo son la willemita, zincita y franklinita, la mayor parte del zinc mundial procede de la esfalerita. Los países productores principales son: Canadá, CIS, Estados Unidos, Australia, Perú, Méjico y Japón. En los Estados Unidos casi el 60% del zinc se produce al este del Río Mississippi, siendo los principales estados productores Tennessee, New York, Pennsylvania y New Jersey. De los estados del oeste de los E.E.U.U., los principales productores son Idaho, Colorado y Utah. En Elmwood, Tennessee, se producen especies minerales sobresalientes.

La blenda es un mineral abundante en España. Se han obtenido buenos cristales en los Picos de Europa, Santander, de donde proviene la variedad *acaramelada*. Abunda en las provincias de Asturias, Santander, Vascongadas y Navarra.

Empleo. Es la mena más importante del zinc. El uso principal del zinc metálico o *peltre* es la galvanización del hierro, la obtención de latón, una aleación de cobre y zinc, las baterías eléctricas y se empleo como planchas de zinc. El óxido de zinc, o blanco de zinc, viene empleándose extensamente en la fabricación de pinturas. El cloruro de zinc se emplea para la conservación de la madera. El sulfato de zinc se emplea en tintorería y medicina. La blenda es también la fuente más importante de cadmio, indio, galio y germanio.

Etimología. Blenda proviene de la palabra alemana *blenden*, que significa *ofuscar*, porque, aunque frecuentemente se parece a la galena, no da plomo. El otro nombre que se le da, *esfalerita*, procede del griego y significa *traidor*.

Especies semejantes. *Greenoquita*, CdS, mineral raro, explotado como fuente de cadmio; es isoestructural en dos formas polimórficas con la esfalerita y la wurtzita. El cadmio se recupera de la greenoquita, asociada con minerales de zinc, especialmente esfalerita.

CALCOPIRITA—$CuFeS_2$

Cristalografía. Tetragonal; $\bar{4}2m$. Corrientemente, tetraédrico por la presencia de caras diesfenoidales p {112} dominantes (véanse las Figs. 10.24 y 10.25). En la Fig. 10.25 se muestran oras formas raras. Normalmente masivo.

$I\bar{4}2d$; a = 5,25, c = 10,32 Å; Z = 4. *d's*: 3,03(10), 1,855(10), 1,586(10), 1,205(8), 1,074(8).

Propiedades físicas. **H** $3\frac{1}{2}$-4. **G** 4,1-4,3. *Brillo* metálico. *Color* amarillo de latón; frecuentemente con pátina broncead a o iridiscente. *Huella* negra verdosa. Frágil.

Composición y estructura. Cu 34,6%, Fe 30,4%, S 35,0%. Se desvía muy poco del $CuFeS_2$ ideal. Véase la Fig. 10.19 para la composición de la calcopirita en el sistema Cu-Fe-S. Su estructura puede considerarse como un derivado de la esfalerita, en la cual la mitad del Zn es sustituido por Cu y la otra mitad por Fe. Esto conduce a la duplicación de la celda unitaria (Fig. 10.15*b*).

Diagnóstico. Se reconoce por su color amarillo de latón, huella negra verdosa. Se distingue de la pirita por ser más blanda que el acero, y del oro, por ser frágil. Se conoce con el nombre de *oro del loco*, término que también se aplica a la pirita.

Yacimiento. La calcopirita es el mineral de cobre más corriente y una de las fuentes más importantes de este metal. La mayor parte de las menas de sulfuros poseen calcopirita, pero los filones más importantes económicamente son los hidrotérmicos y los depósitos de reemplazamiento. En los depósitos de baja temperatura, como en los existentes en el distrito del Triple Estado, se presenta en forma de pequeños cristales asociados a la galena, esfalerita y dolomita. Asociado a la pirrotita y la pentlandita, es el principal mineral de cobre de las menas de Sudbury, Ontario, y de depósitos semejantes de alta temperatura. La calcopirita es el principal mineral de cobre primario presente en los depósitos de "cobre porfídico". Aparece también como un constituyente primario de las rocas ígneas en las pegmatitas; se encuentra también en depósitos metamórficos de contacto y diseminada en rocas esquistosas. Puede contener oro o plata y convertirse en mena de estos metales. Frecuentemente, se halla en cantidades menores en grandes masas de pirita, transformándolas así en menas de cobre de poca riqueza.

A continuación se dan los nombre de unas cuantas localidades y países en los cuales la calcopirita es la mena principal del cobre: Cornwall, Inglaterra; Falun, Suecia;

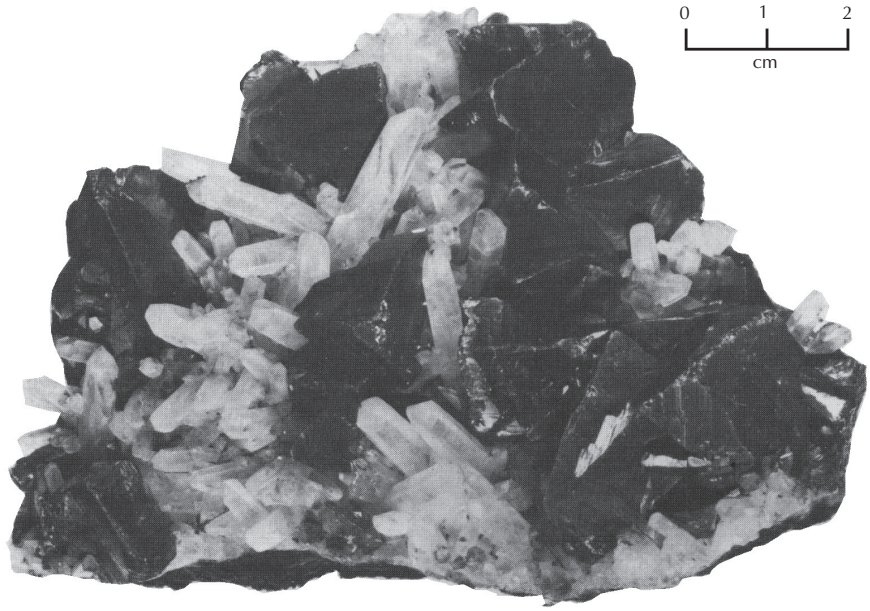


FIGURA 10.24 Cristales de calcopirita y cuarzo, St. Agnes, Cornwall, Inglaterra. (Harvard Mineralogical Museum.)

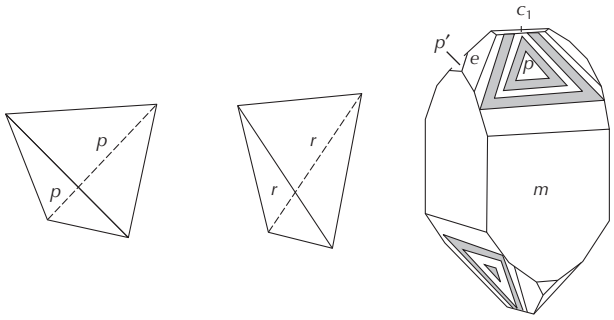


FIGURA 10.25 Cristales de calcopirita.

Schemnitz y Schlaggenwald, Checoslovaquia; Freiberg, Sajonia, Alemania; Riotinto, Huelva, España; África del Sur; Zambia; y Chile. Es muy frecuente en los Estados Unidos, casi siempre en relación con otros minerales de cobre en igual o mayor cantidad. Se halla en Butte, Montana; Bingham, Utah; Jerome, Arizona; Ducktown, Tennessee; diversos distritos de California, Colorado, y Nuevo México. En el Canadá, los yacimientos más importantes de calcopirita son los de Sudbury, Ontario, y en el distrito de Rouyn, Quebec.

Alteración. La calcopirita se altera frecuentemente transformándose en malaquita, azurita, covelina, calcosina y cuprita. Las concentraciones de cobre en la zona de enriquecimiento supergénico son frecuentemente el resultado de dicha alteración y emigración del cobre en disolución con deposición subsiguiente.

Empleo. Mena importante de cobre.

Etimología. Derivado de una palabra griega que significa cobre y de *pirita*.

Especies semejantes. *Estannita*, Cu_2FeSnS_4, tetragonal, es un mineral raro y una mena de poca importancia del estaño. La estructura cristalina de la estannita puede deducirse de la que posee la calcopirita, sustituyendo en ésta, parte del Cu por Fe y Sn (véanse las páginas 387-389).

PIRROTITA (Piritas magnéticas) —$Fe_{1-x}S$

Cristalografía. Monoclínico; 2/*m* para la forma estable de baja temperatura, por debajo de 250°C; hexagonal, 6/*m* 2/*m*2/*m* para la forma estable de alta temperatura. Cristales hexagonales, usualmente tabulares, pero en algunos casos piramidales (Fig. 10.26), que indican la formación del polimorfo de alta temperatura.

*A*2/*a*; $a = 12{,}78$, $b = 6{,}86$, $c = 11{,}90$, $\beta = 117°17'$, $Z = 4$. No se especifican las *d's* porque existen varias formas monoclínicas.

*C*6/*mmc*; $a = 3{,}44$, $c = 5{,}73$ Å, $Z = 2$. *d's*: 2,97(6), 2,63(8), 1,06(10), 1,718(6), 1,045(8).

Propiedades físicas. **H** 4. **G** 4,58-4,65. *Brillo* metálico. *Color* bronce pardo. *Huella* negra. Magnético, aunque varía mucho en intensidad; los ejemplares menos magnéticos son los más ricos en hierro. Opaco.